

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Konstrukční řešení vážené nádoby jako součásti plně  
automatizovaného systému plnění formy lisu

Design of Weighing Hopper as Part of Fully Automated  
Filling System of Press

Student: Bc. Kateřina Urbanová

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Nečas, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Institut dopravy

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Kateřina Urbanová**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství**

Specializace: **35 Dopravní stroje a manipulace s materiálem**

Téma: **Konstrukční řešení vážené nádoby jako součásti plně automatizovaného systému plnění formy lisu**  
**Design of Weighing Hopper as Part of Fully Automated Filling System of Press**

Jazyk vypracování: **čeština**

### Zásady pro vypracování:

Navrhněte zařízení pro váženou nádobu jako součást plně automatizovaného systému plnění formy 500 t lisu.

Zařízení musí splňovat následující podmínky:

- systém musí být plně automatický s min. potřebou obsluhy operátorem;
- dávkování materiálové směsi do lisovací formy musí být hmotnostní;
- hmotnost náplně dle velikosti formy;
- u hmotnosti náplně 9 kg je požadovaná přesnost dávkování v rozmezí  $\pm 50$  g, tzn.  $\pm 0,55\%$ ;
- požadovaný čas přípravy další dávky směsi 60 s;
- předání směsi z odvažovací nádoby do formy max. 10 s;
- min. štěrbina mezikruží lisovací formy 15 mm;
- zavážecí systém musí být schopen plnit lisovací formy se dvěma komorami;
- zavážecí systém musí být stavitelný.

V rámci diplomové práce proveďte:

- 1) Rešerši z oblasti vhodných typů řešení.
- 2) Návrh možných variant řešení technologie pro plnění lisu.
- 3) Technologický návrh zařízení s důrazem na výše uvedené parametry a mechanicko-fyzikální vlastnosti plniva.
- 4) Potřebné pevnostní výpočty.
- 5) Konstrukční návrh daného řešení.

### Seznam doporučené odborné literatury:

Polák, J. Bailotti, K. Pavliska, J. Hrabovský, L.: Dopravní a manipulační zařízení II, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2003, ISBN 80-248-0493-X.

Cvekl, Z. Dražan, F.: Teoretické základy transportních zařízení. Praha: SNTL Praha, 1976.

Dražan, F., Kupka, L.: Transportní zařízení. Praha: SNTL/SVTL Praha 1966.

Polák, J., Pavliska J., Slíva, A.: Dopravní a manipulační zařízení I. Skriptum, Ostrava: VŠB-TU Ostrava 2001. ISBN 80-248-0043-8.

Pešat, Z.: Manipulace s materiálem v hutích I. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1992, ISBN 80-7078-107-6.



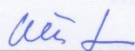
Prospekty, firemní materiály.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

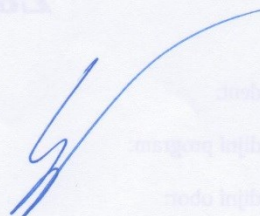
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Nečas, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

***Místopřísežné prohlášení studenta***

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....  
21.5.2018

.....  
Kubánová

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2018 .....

Kateřina Urbanová' .....

plné jméno autora práce

Kateřina Urbanová

Heřmánková 857/1

Ostrava - Heřmanice, 713 00

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

URBANOVÁ, K. *Konstrukční řešení vážené nádoby jako součásti plně automatizovaného systému plnění formy lisu: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2018, 66 s. Vedoucí práce: Nečas, J.

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem vážené nádoby, která je součástí plně automatizovaného systému plnění formy lisu. Úvod práce je věnován řešerši z oblasti dávkování a vážení sypkých hmot, a také problematice konstrukčních řešení vážených zásobníků. Dále je popsán současný stav pracoviště, do kterého je navrhované řešení určeno. Následuje popis možných variant řešení, z nichž je vybrána jedna možnost, která je nadále rozvíjena. Je provedeno měření mechanicko-fyzikálních vlastností, na základě kterých, je následně proveden technologický návrh dávkovacího zařízení. Správnost zvolených komponentů je ověřena výpočty. V závěru je navržené dávkovací zařízení podrobeno provozním zkouškám k ověření funkce při plnění lisovací formy. Součástí diplomové práce je výkresová dokumentace dávkovacího zařízení.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

URBANOVÁ, K. *Design of Weighing Hopper as Part of Fully Automated Filling System of Press: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2018, 66 p. Thesis head: Nečas, J.

The master thesis deals with the design of the weighing hopper, which is part of the fully automated filling system of the press. The introduction of the thesis is devoted to the field of dosing and weighing of bulk materials, as well as to the design solutions of weighed containers. The current state of the workplace in which the proposed solution is addressed is also described. The following is a description of possible solution variants, one of which is chosen and continues to be developed. Measurement of mechanical and physical properties is carried out, on the basis of which a technological design of the dosing device is subsequently realized. The correctness of the selected components is verified by the calculations. At the end, the proposed dosing device is subjected to operational tests to verify the function of filling press. Part of the master thesis is the drawing documentation of the dosing device.

## Seznam použitých zkratk a značek

$A$	amplituda kmitu	[m]
$A/D$	analogově digitální převodník	-
$A_0$	momentální výchylka	[m]
$A_{sk}$	skutečná amplituda	[m]
$f$	frekvence	[Hz]
$F_1'$	Jansenova síla ve vertikálním směru	[N]
$F_B$	budící síla	[N]
$F_{Bmax}$	maximální budící síla	[N]
$f_e$	součinitel vnitřního tření	[-]
$ff_c$	tokovost	[-]
$F_{Omax}$	maximální odstředivá síla	[N]
$F_s$	smyková síla	[N]
$F_v$	normálové zatížení	[N]
$g$	tíhové zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
$G_u$	tíha uzávěru	[N]
$i$	počet závaží	[-]
$K$	součinitel deformační citlivosti	[-]
$k$	koeficient synnosti	[-]
$k_p$	tuhost pružných elementů	[N.m <sup>-1</sup> ]
$k_{p1}$	tuhost jednoho pružného elementu	[N.m <sup>-1</sup> ]
$k_{ps}$	tuhost silentbloku	[N.m <sup>-1</sup> ]
$K_u$	odpor při otevírání uzávěru	[N]
$l_0$	délka vodiče	[m]
$m_c$	celková hmotnost vibrujících částí	[kg]
$m_k$	hmotnost konstrukce	[kg]
$m_m$	hmotnost materiálu	[kg]
$m_{mMAX}$	maximální hmotnost materiálu	[kg]
$m_n$	hmotnost nevývažku	[kg]
$n$	otáčky	[min <sup>-1</sup> ]

$n_p$	počet pružných elementů	[-]
$n_v$	otáčky vibromotoru	[min <sup>-1</sup> ]
$o$	obvod	[m]
$o_{115}$	obvod vnějšího otvoru	[m]
$o_{85}$	obvod vnitřního otvoru	[m]
$P$	stoupání šroubovice	[m]
PLC	programovatelný logický automat	-
$R$	nominální odpor	[Ω]
$r$	poloměr rotace nevývažku	[m]
$R_1$	hydraulický poloměr	[m]
$R_{115}$	hydraulický poloměr vnějšího otvoru	[m]
$R_{85}$	hydraulický poloměr vnitřního otvoru	[m]
$r_{\S}$	poloměr pohybové kružnice šroubovice	[m]
$S$	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$S_{115}$	obsah vnějšího otvoru	[m <sup>2</sup> ]
$S_{85}$	obsah vnitřního otvoru	[m <sup>2</sup> ]
$S_k$	plocha měřicího kroužku	[m <sup>2</sup> ]
$S_m$	plocha mezikruží	[m <sup>2</sup> ]
$S_v$	průřez vodiče	[m <sup>2</sup> ]
$t$	čas	[s]
$V_n$	objem nádoby	[m <sup>3</sup> ]
$V_{nMAX}$	maximální objem nádoby	[m <sup>3</sup> ]
$z$	koeficient naladění	[-]
$\rho$	rezistivita	[Ωm]
$\Delta l$	změna délky	[m]
$\Delta R$	změna odporu	[Ω]
$\varepsilon$	relativní deformace ve směru délky	[-]
$\pi$	pí	[-]
$\varphi$	úhel vnitřního tření	[°]
$\rho_s$	sypná hmotnost	[kg.m <sup>-3</sup> ]



$\sigma$	normálové napětí obecné	[Pa]
$\sigma_1$	hlavní normálové napětí	[Pa]
$\tau$	smykové napětí obecné	[Pa]
$\tau_w$	smykové napětí měřeného materiálu	[Pa]
$\tau_c$	počáteční soudržné napětí	[Pa]
$\psi_s$	sypný úhel	[°]
$\omega$	úhlová rychlost	[s <sup>-1</sup> ]
$\varphi_e$	úhel vnitřního tření efektivní	[°]
$\varphi_{lin}$	úhel vnitřního tření linearizovaný	[°]
$\sigma_w$	normálové napětí měřeného materiálu	[Pa]
$\varphi_w$	úhel vnějšího tření	[°]
$\varphi_w^{ocel}$	úhel vnějšího tření ocel	[°]
$\varphi_w^{nerez}$	úhel vnějšího tření nerez	[°]
$\varphi_w^{Murtfeldt}$	úhel vnějšího tření Murtfeldt	[°]
$\beta$	úhel stěny	[°]
$\varphi_s$	fázové posunutí šroubovice	[-]
$\varphi_p$	fázový posun	[rad]
$\omega_0$	vlastní kruhová frekvence	[rad.s <sup>-1</sup> ]
$\gamma_s$	sypná tíha materiálu	[N]
$\sigma_{1u}$	tlak sypného tělesa na uzávěr	[Pa]
$\mu$	součinitel tření mezi materiálem a uzávěrem	[-]

# Obsah

strana

Seznam použitých zkratk a značek .....	7
Úvod.....	12
1    Dávkování sypkých hmot v průmyslových procesech .....	13
1.1    Kontinuální vážení.....	13
1.2    Diskontinuální vážení .....	15
1.3    Konstrukční řešení vážených zásobníků.....	17
1.4    Tenzometry .....	18
1.5    Vyhodnocovací a řídicí jednotky zásobníkových vah .....	21
1.6    Přídavná zařízení pro vyprazdňování zásobníků .....	21
2    Popis technologie pracoviště lisu – současný stav.....	23
3    Návrh možných variant řešení technologie pro plnění lisu .....	26
3.1    Mechanické vyprazdňování dávkovací nádoby .....	26
3.2    Pneumatické vyprazdňování dávkovací nádoby.....	27
3.3    Vibrační vyprazdňování dávkovací nádoby .....	28
4    Měření mechanicko-fyzikálních vlastností materiálu.....	29
4.1    Úhel vnitřního tření – rotační smyková zkouška .....	29
4.2    Úhel vnějšího tření.....	30
4.3    Sypný úhel .....	33
4.4    Vlhkost.....	35
4.5    Sítová analýza.....	35
4.6    Souhrn měření.....	37
5    Technologický návrh .....	39
5.1    Zjednodušený návrh nádoby .....	39
5.2    Zkouška vlivu vibrací na vyprázdnění nádoby .....	41
5.3    Konstrukční návrh dávkovacího zařízení .....	43
6    Technologické a pevnostní výpočty .....	45
6.1    Teoretický rozbor vibrací .....	45
6.2    Výpočet vibromotoru.....	47
6.3    Výpočet potřebné tuhosti pružných elementů .....	49
6.4    Výpočet odporu při otevírání uzávěru .....	52

7	Provozní zkoušení dávkovacího zařízení.....	57
7.1	Příprava zkoušení.....	57
7.2	Průběh zkoušek.....	58
7.3	Zhodnocení provedených zkoušek .....	59
8	Technický popis zařízení .....	60
	Závěr .....	61
	Seznam použitých zdrojů.....	63
	Seznam příloh .....	65

## Úvod

Diplomová práce je vypracována ve spolupráci s firmou DSD-Dostál a.s., Dřevohostice, která se specializuje na projektování a výrobu zařízení pro manipulaci se sypkými hmotami. Úkolem diplomové práce je návrh konstrukčního řešení vážené nádoby, která je součástí plně automatizovaného systému plnění formy lisu keramickou směsí. Požadavek na řešení problematiky vyvstal od zákazníka, který požaduje výměnu stávající technologie, z důvodu nevyhovujícího způsobu provozu během výroby průmyslových keramických komponent.

V současnosti je dávkování keramické směsi do formy realizováno objemově, ovšem toto řešení není vhodné, protože dochází k velkým parametrovým rozdílům mezi jednotlivými výrobky, z důvodu nestejného objemu keramické směsi nasypaného do formy.

Vzhledem k tomu, že se jedná o návrh do reálného provozu, byly zákazníkem určeny podmínky, které zařízení musí splňovat. Ke zjištění charakteristiky dávkovaného materiálu je nutné provést mechanicko-fyzikálních vlastností, přičemž naměřené hodnoty poslouží k technologickým výpočtům a návrhu zařízení. Keramická směs má specifické vlastnosti, je velmi soudržná, takže nedochází k uvolňování materiálu do formy pouze gravitačním způsobem. Bude tak zřejmě nutné v návrhu počítat s využitím externí energie, která usnadní pohyb materiálu.

# 1 Dávkování sypkých hmot v průmyslových procesech

Vážení je jedno z nejpřesnějších způsobů zjišťování hmotnosti. Využívá se k měření hmotnosti kusových, tekutých i sypkých materiálů ve všech, nejen průmyslových odvětvích. Podle účelu vážení lze obecně váhy rozdělit do dvou skupin:

- váhy technologické,
- váhy pro obchodní styk. [1]

Technologické váhy jsou měřidla, které nepodléhají ověřování. Metrologické a technologické parametry se uvádějí v podnikových nebo oborových normách. Kalibrace, kontrola přesnosti a stálosti je výhradní záležitostí provozovatelů a uživatelů těchto typů vah. Maximální povolená chyba vážení bývá definována relativní chybou vztaženou k vážicímu rozsahu a obvykle se pohybuje v rozmezí 0,1 % – 5 %. [2]

Váhy pro obchodní styk jsou stanoveným měřidlem, které Ministerstvo průmyslu a obchodu stanovuje vyhláškou k povinnému ověřování s ohledem na jejich význam. Právní hlediska jsou definována Zákonem o metrologii.

Rozdíl mezi technologickými a obchodními váhami spočívá v možnostech ověřování a garantování správně určené hmotnosti po určitou dobu.

Podle způsobu realizace procesu vážení se dělí následovně:

- kontinuální vážení
- diskontinuální vážení.

## 1.1 Kontinuální vážení

Kontinuální vážení je proces, během kterého je hmotnost měřena průběžně a je udávána ve vztahu k časovému intervalu (např.  $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Chyby vážení jsou udávány ve vztahu k okamžité hodnotě přepravovaného množství materiálu.

Kontinuální váhy se nejčastěji se využívají ke zjišťování velikosti průtoku sypkých hmot.

*Pásové váhy* se využívají ke sledování hmotnosti přepravovaného materiálu, popř. k dávkování. K vážení slouží válečková stolice, která je konstrukčně přizpůsobená pásovému dopravníku. Obvykle je konstrukce osazena tenzometrickými snímači a

rychlostním čidlem. Signál o zatížení vyhodnocuje procesní terminál. Přesnost vážení se pohybuje v rozmezí 0,25 % – 2 %, v závislosti na dopravníkovém pásu a provozních podmínkách.



*Obr. 1 Pásová váha [7]*

*Průtokoměry sypkých hmot* se volí v případech, kdy jsou sypké hmoty dopravovány jinak než pásovou dopravu. Zařízení jsou buď se šikmou skluzovou nebo odraznou plochou. Protékající materiál působí na šikmou plochu silou, která je úměrná okamžité hodnotě průtoku materiálu ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Síla je měřena běžným snímačem zatížení. Množství proteklého materiálu je rovno integrálu okamžité hodnoty průtoku za určitou časovou jednotku. Provozní chyba bývá v rozsahu 2 - 5%. Při instalaci průtokoměrů je velmi problematická jejich kalibrace. Tu lze provést pouze zkouškou, protože přesnost měření je závislá na vlastnostech dopravovaného materiálu a jejich změnách v průběhu transportu. Kinetická energie materiálu se mění na odrazné desce v tlakovou sílu, na skluzové desce v moment síly. Účinky změn závisí na protékajícím množství, ale také na zrnitosti a sypné hmotnosti materiálu.



*Obr. 2 Průtokoměr sypkých hmot [8]*



*Průtokoměry sypkých hmot na Coriolisově principu* jsou vhodné pro granuláty a jemné homogenní materiály. Využívají Coriolisův princip a dosahují vyšších přesností než výše uvedené průtokoměry.

Skládají se z měřicího kola s motorem a převodovkou, volně uloženého ve skříni. V pevné poloze je kolo fixováno snímačem polohy a frekvence otáčení je také snímána. Materiál dopadá do středu kola, ze kterého je směřován k okrajům pomocí lopatek. Na sypký materiál pohybující se po rotujícím kole působí Coriolisova síla. Tato síla vyvolává reakční moment, který je vyhodnocován snímačem. Velikost momentu je úměrná protékajícímu množství materiálu. V případě teoretického nastavení se dosahuje maximální chyby okolo 2 %, kalibrací s materiálovou zkouškou lze dosáhnout 0,5 %. [3]

## 1.2 Diskontinuální vážení

Diskontinuální vážení je založeno na zjišťování hmotnosti přesně definovaného a ohraničeného objektu. Vážený předmět se umísťuje na nosič břemene, jehož rozměry a tvar jsou uzpůsobeny váženému předmětu. Hmotnost je vyjádřena v g, kg, t, atd. Mezi diskontinuální váhy se řadí váhy pro silniční a kolejová vozidla, jeřábové váhy, plošinové a zásobníkové váhy, váhy ve válečkových tratích.

*Váhy silničních vozidel* jsou určeny pro obchodní vážení v úrovnovém nebo nájezdovém provedení. Nejčastěji jsou váhy umístěny v úrovni vozovky. Vážící rozsah se pohybuje v rozmezí 30 – 60 t. Silniční vozidla je možno vážit i v pohybu, pokud vyhovují speciální normě. Za určitých podmínek je takto dosaženo rychlejšího vážení, avšak vážení je méně přesné než vážení statické.



*Obr. 3 Váha silničních vozidel [9]*

*Váhy kolejových vozidel* slouží pro obchodní vážení hmotnosti vagónů. Vážít lze vagon v klidu, případně vagon přejíždí nízkou konstantní rychlostí po vážicím mostu. Zatížení zaznamenávají senzory umístěné v základové vaně. Existují také bezzákladové váhy.

*Jeřábové váhy* měří pomocí senzorů zatížení přemísťovaného předmětu. Instalace senzorů je provedena tak, aby docházelo k měření bez rušivých vlivů působících při transportu.



*Obr. 4 Jeřábová váha [10]*

*Plošinové váhy* bývají vyráběny ve variantě nadúrovňové nebo v rovně podlahy. Rozmezí váživosti se pohybuje mezi několika kg až po desítky tun. Plošinové váhy umožňují i navažování balíků na předem stanovenou hmotnost.



*Obr. 5 Plošinová váha [11]*

*Váhy ve válečkových tratích* váží kusový materiál dopravovaný po válečkových tratích. Bývají vestavěny do samostatné části a jsou osazeny senzory. Ty jsou napojeny na elektronickou řídicí jednotku, která snímá pohyb břemene a zároveň zaznamenává hmotnost. [2]

*Zásobníkové váhy* jsou určeny pro vážení kapalných a sypkých materiálů v zásobnících různých tvarů a velikostí. Zásobníkové váhy mohou také plnit funkci dávkovacího zařízení. Váživost se pohybuje od několika desítek gramů do několika tun. Základ tvoří konstrukce zajišťující přenos zatížení na senzory. Váhy mohou být postaveny, nebo zavěšeny na měřicí senzory. Zatížení snímají nejčastěji tři až čtyři tenzometry. Způsob osazení tenzometrů odpovídá konstrukčním požadavkům samotných zásobníků. Váhy mohou být v provedení technologickém nebo jako stanovené měřidlo. [4]

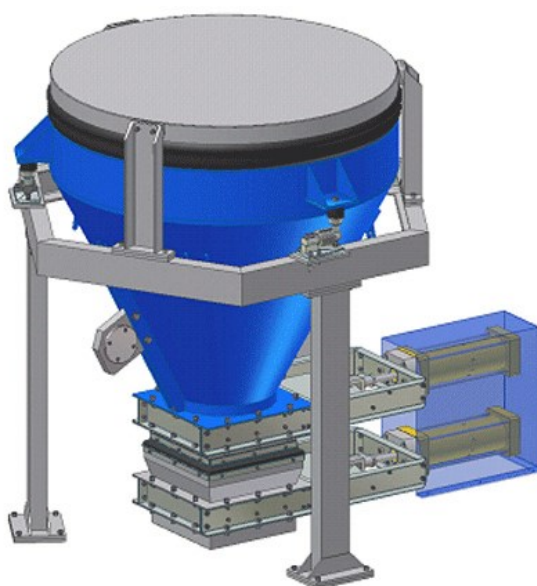


*Obr. 6 Zásobníková váha [12]*

### 1.3 Konstrukční řešení vážených zásobníků

Ve většině průmyslových aplikací jsou zásobníkové váhy kombinované s dávkovacím zařízením. Takto uzpůsobené dávkovací váhy jsou vhodné pro přípravu jednotlivých dávek jednoho nebo více sypkých materiálů pro následné mísení, či jiné zpracování materiálů. Tvar a velikost zásobníku je předurčen požadovanou velikostí dávky a mechanickými vlastnostmi materiálu a také dostupným prostorem v okolí technologie. Zásobníky bývají většinou uzavřeny, aby bylo zabráněno úniku prachu a napojeny na filtrační zařízení. Jako součást dávkovacích vah je nutné řešit vhodný výběr dávkovacích dopravníků, předzásobníků s větším objemem materiálu, systém plnění a

vyprazdňování a také s následnou manipulací s nadávkovaným materiálem. Dále je nutno zvolit vhodný konstrukční materiál zásobníkové váhy (černý plech, nerez, otěruvzdorné materiály atd.). Výběrem vhodného materiálu lze zabránit tvorbě nálepů u problematických sypkých materiálů. Vyprazdňování zásobníků sypkých materiálů bývá problematickou stránkou manipulace, proto se využívají systémy podpory vyprazdňování, jako jsou například vibrátory, čeřící zařízení, mechanické rozrušovače aj. Dále je nutno řešit odvětrávání zásobníků v případě, že jsou uzavřené – například napojení na centrální odvětrání, přefukové či filtrační pytle, tkaninové filtry atd. Vyprazdňování bývá realizováno pomocí uzávěrů s různými typy pohonů a vynášecími dopravníky. [5]



*Obr. 7 Konstrukce váženého zásobníku [5]*

Snímače zatížení jsou nezbytnou součástí každé elektronicky řízené váhy. Fungují na principu převodu síly na elektrický signál. Snímače jsou vyráběny ve velmi široké škále provedení, od single point, přes ohybové snímače až po tlakové snímače silničních, kolejových a zásobníkových vah.

#### 1.4 Tenzometry

Tenzometr je pasivní elektrotechnická součástka, využívaná k měření deformací, sil, tlaků a momentů, které působí na pevná tělesa. Jedná se tak o převodník k elektrickému měření neelektrických veličin. Figuruje v měřicím řetězci, používá se tedy v součinnosti s ostatními přístroji, dle oblasti měření. Fyzicky tenzometr představuje pasivní čidlo, které je buď nalepeno na povrchu součásti (páskový tenzometr) nebo pevně

spojený s měřeným tělesem (průmyslové tenzometry pro váhy). Tenzometry pracují se změnou odporu mechanicky namáhaného vodiče o délce  $l_0$ , s průřezem  $S_p$  a rezistivitou  $\rho$ . Změny odporu jsou dány změnou délky vodiče o  $\Delta l$  – proto jsou tenzometry nejcitlivější na deformace po směru delší strany (protažení, ohnutí).

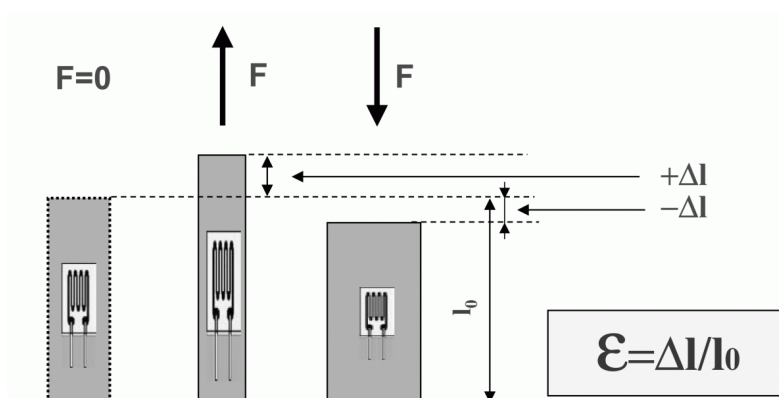
Při měření tenzometry sledujeme relativní změnu odporu  $\Delta R/R$ . Častěji se relativní změna odporu vyjadřuje koeficientem  $K$ , tj. součinitelem deformační citlivosti, kdy platí vztah:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (1)$$

kde:  $\varepsilon [-]$  ... relativní deformace tenzometru ve směru délky tenzometru

$R [\Omega]$  ... nominální odpor tenzometru v nenamáhaném stavu, při  $F = 0$

Velikost konstanty  $K$  závisí na použitém materiálu odporového drátku. U kovových tenzometrů má konstanta hodnotu přibližně 2, odchylky může způsobit odlišné složení materiálu.



Obr. 8 Princip funkce tenzometru [6]

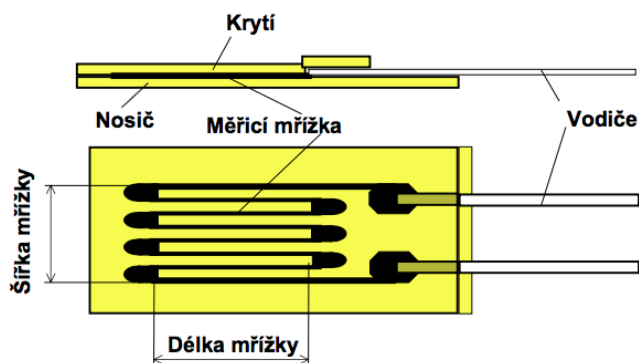
Tenzometry rozdělujeme podle měřené veličiny na snímače tlaku a snímače deformace, podle použitého materiálu na kovové snímače a polovodičové snímače.

Při funkci snímače se uplatňují některé parazitní vlivy. Patří zde příčná citlivost (závislost změny odporu na příčné deformaci) a změna teploty, při níž se mění odpor tenzometru, ale také parametry podložky a lepidla. Dodatečné chyby způsobuje hystereze a nelinearita. Nevýhodou tenzometrů je také časová změna vlastností. Polovodičové tenzometry jsou tvořeny monokrystaly nebo polykrystaly nejčastěji křemíku nebo

germania. Tyto snímače jsou silně nelineární. Mají vysokou teplotní závislost odporu a jsou fotocitlivé. Pro redukci negativních vlivů lze využít kompenzačního tenzometru, nebo využít čtyřvodičového zapojení senzorů, či zapojit tenzometry do Wheatstoneova můstku.

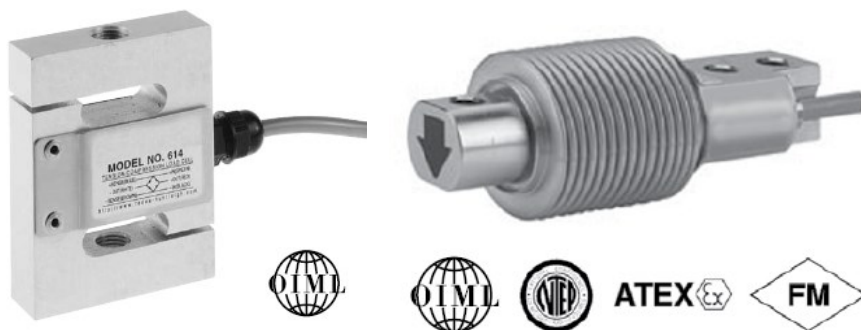
Dělení kovových tenzometrů:

- drátové – volné, či lepené provedení k ohebné izolační položce
- vrstvé – vakuově nebo naprašováním vrstvené na ohebnou izolační podložku
- foliové – odporová kovová folie aplikovaná na ohebnou podložku



Obr. 9 Schéma foliového tenzometru [13]

V současnosti jsou nejvíce využívány foliové tenzometry. Ve většině případů jsou umístěny v pouzdře průmyslových tenzometrických snímačů. Pouzdro chrání tenzometry před vlhkostí, znečištěním a dalšími vlivy okolního prostředí.



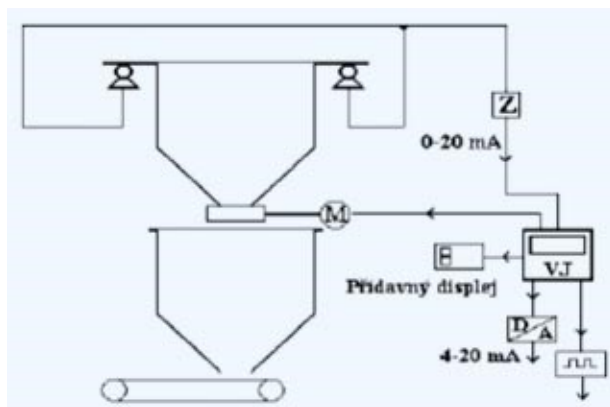
Obr. 10 Příklady provedení tenzometrických snímačů [14]



Při měření je nutné natočit tenzometr do správného směru působení sil. Základní jednoduché tenzometry jsou schopny měřit pouze v jednom směru. Pokud je nutné měřit síly či deformace ve více směrech, lze využít tenzometry s více měřícími meandry natočených do různých směrů – do kříže či do růžice. [6]

### 1.5 Vyhodnocovací a řídicí jednotky zásobníkových vah

Elektronické vyhodnocovací a řídicí jednotky pro zásobníkové váhy sdružují funkci vážení a řízení vážícího procesu. Tyto jednotky automaticky plní nebo vyprazdňují zásobník na předem zvolenou hodnotu. Často se tyto dva kroky kombinují. Jednotky primárně zpracovávají výstupy snímačů zatížení, ale lze zpracovávat i další parametry související s vážením, například úroveň zaplnění zásobníku, stavy uzávěrů apod. Snímače se zapojují přes sdružovací krabici do vyhodnocovací jednotky. Jednotka většinou obsahuje zesilovač a A/D převodník pro připojení tenzometrických snímačů zatížení.



Obr. 11 Schéma zapojení zásobníkové dávkovací váhy [15]

### 1.6 Přídavná zařízení pro vyprazdňování zásobníků

Pro podporu vyprazdňování materiálů ze zásobníků jsou k dispozici různá zařízení, která působením externí energie usnadňují tok materiálu ze zásobníků, či jiných skladovacích zařízení.

*Pneumatická zařízení* fungují na principu uvolňování materiálu pomocí tlakového vzduchu nebo inertního plynu. Využívají se provzdušňovací trysky, čeřící desky a pro náročnější materiály vzduchová děla. Výhodou těchto zařízení oproti jiným principům je šetrnost vůči mechanickému poškození stěn zásobníků a nízká hluchost. Vzduchová zařízení je možné instalovat jak na vnitřní, tak vnější stěnu zásobníku. [23]



*Obr. 12 Provzdušňovací tryska [23]*

*Vibrační zařízení* materiál uvolňují a rozrušují vlivem řízených vibrací. Používané jsou vibrační dna, či závěsné vibrátory. Nevýhodou je značné namáhání konstrukce a také zvýšená hlučnost zařízení.

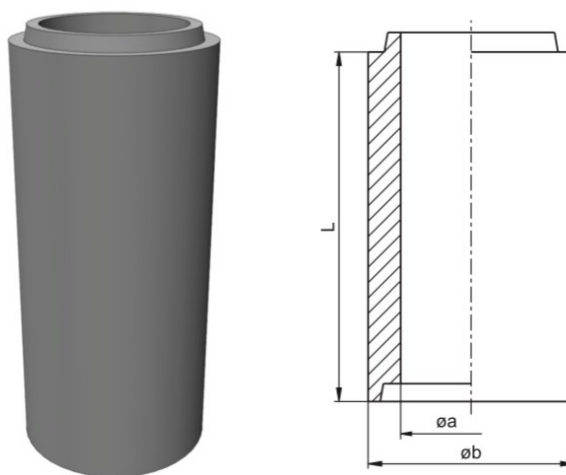
*Mechanická zařízení* jsou instalována uvnitř zásobníků, ke napomáhají ke zkypření materiálu. Mezi tato zařízení se řadí šnekové nože a otočné vestavby.

*Pasivní prvky* jsou rovněž instalovány uvnitř zásobníků, ovšem na rozdíl od výše uvedených zařízení nevnášejí do systému přídavnou energii. Jejich úkolem je usměrňovat energii materiálu. Umisťují se do místa vzniku klenby, čímž dojde k jejímu posunutí do vyšší oblasti zásobníku. Cílem je dosažení hmotového toku materiálu v zásobníku. [24]

## 2 Popis technologie pracoviště lisu – současný stav

Lis je součástí výrobní technologie žáruvzdorných keramických komponentů, které mají jednorázové využití v sestavách licích systémů při odlévání kovů. Stávající výrobní proces se skládá z násypky, ve které je umístěna keramická směs. Vyprazdňování násypky je podpořeno umístěným vibračním elektromotorem. Z násypky putuje materiál přes pásový dopravník do vozíku zavážecího zařízení. Zavážecí zařízení se následně přemístí nad úroveň formy, která je složena ze dvou komor pro výrobu dvou kusů tvarovek. Zavážecí zařízení vypustí připravený materiál do forem, přesune se zpět do původní polohy a materiál ve formách je stlačen beranem.

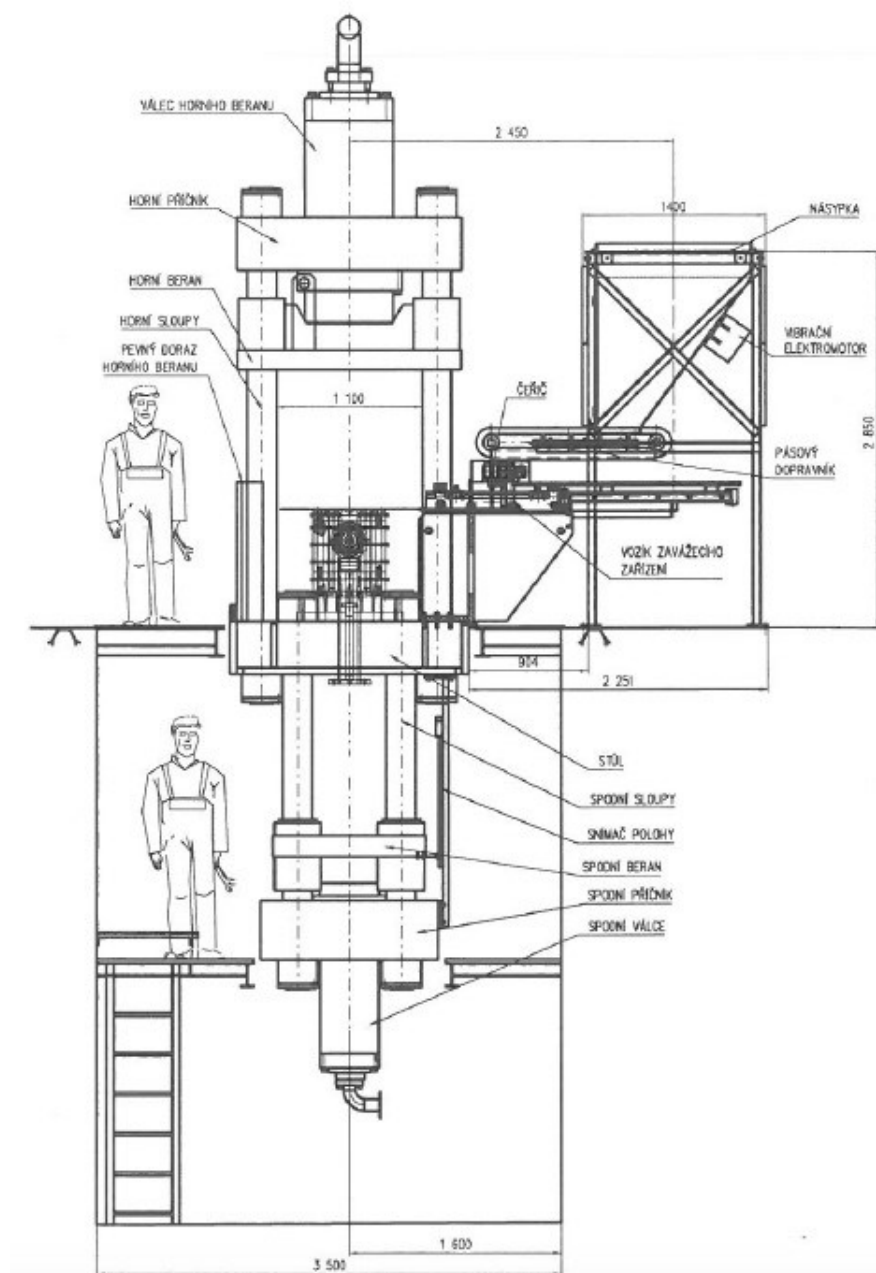
Maximální hmotnost náplně jednoho hnízda formy je 12 kg, minimální hmotnost náplně jednoho hnízda formy je 2 kg. Objem lisovací formy je vždy větší než objem nasypané hmoty (nejméně cca o 50 mm výšky formy). Násypná výška hmoty ve formě je přibližně dvojnásobná oproti konečné výšce výlisku (hotového výrobku). Formy mají různou osovou vzdálenost komor. Osová vzdálenost dvou komor formy je v rozmezí  $240 \div 266$  mm, výška lisovacích forem je vždy stejná. Komory formy mají vyměnitelný trn, pro výrobu různých rozměrů tvarových výrobků.



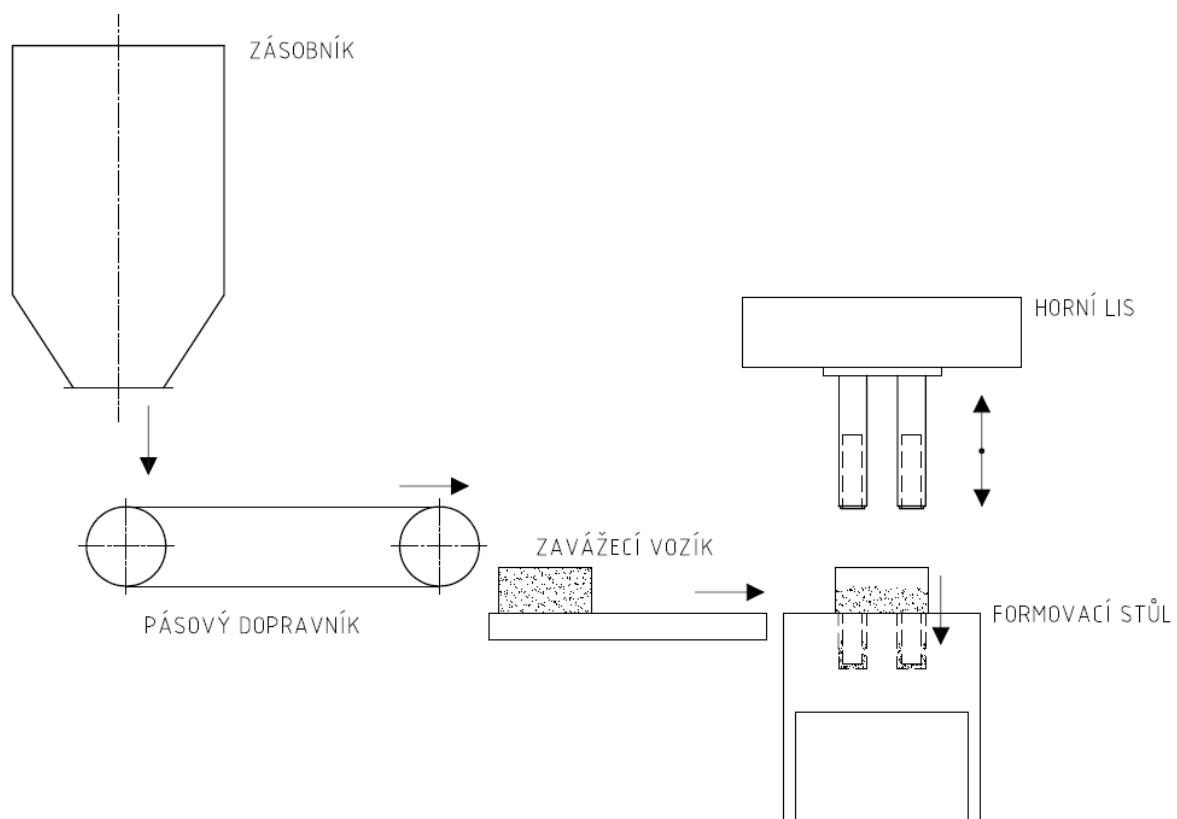
*Obr. 13 Výrobek lisu – keramický komponent vtokové soustavy [16]*

Současné řešení dávkování do formy je velmi problematické, dochází k nesteromnému plnění forem, z čehož následně vznikají zmetkové výrobky. Také je vyžadována činnost obsluhujícího pracovníka, čemuž se zadavatel chce vyhnout a požaduje plně automatické řešení. Řídicí systém není předmětem řešení, bude zajištěn zadavatelem. Bude k tomu vyžit řídicí systém lisu (PLC SIEMENS S7-315-2DP). Je

nutné brát v úvahu možnost připojení nových komponent k řídicímu systému prostřednictvím sítě PROFIBUS-DP.



Obr. 14 Schéma lisu



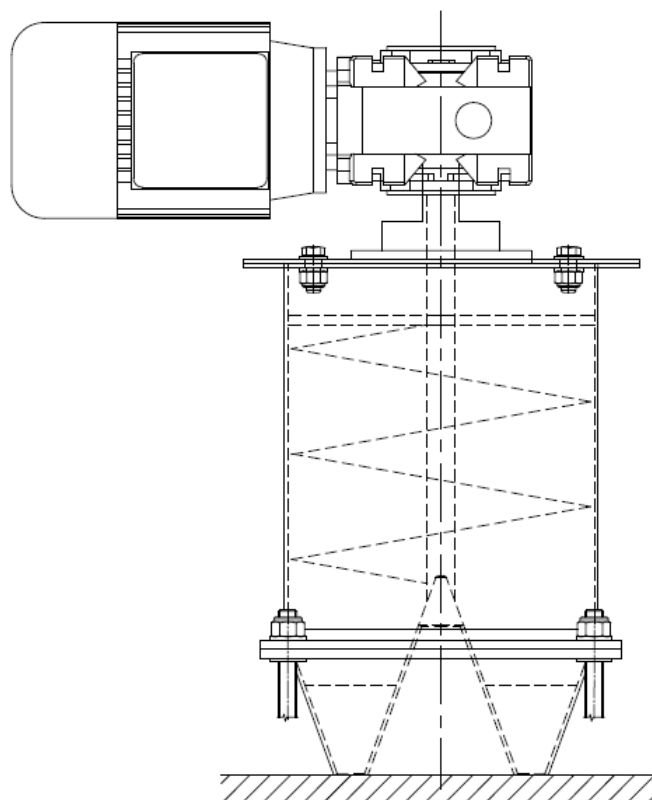
*Obr. 15 Schéma toku materiálu – stávající stav*

### 3 Návrh možných variant řešení technologie pro plnění lisu

Návrhy níže uvedené obsahují přídatná zařízení, která napomáhají toku materiálu. Zařízení lze rozdělit do dvou skupin – s aktivními a pasivní prvky. Aktivní prvky vnášejí do soustavy přídatnou energii a prvky pasivní energii v soustavě pouze usměrňují, či transformují.

#### 3.1 Mechanické vyprazdňování dávkovací nádoby

Návrh mechanického vyprazdňování nádoby pomocí šneku umístěného uvnitř nádoby, poháněného převodovým elektromotorem. Šnek otáčením materiál zkypřuje, rozrušuje vazby mezi zrny, a tak usnadňuje odtok materiálu. Šnek ovšem zaplňuje velkou část nádoby, proto by bylo nutné zvětšit nádobu o tento objem. Také samotný materiál by vlivem zkypření zvětšil svůj objem, takže by bylo nutné dbát na to, aby nebyla nádoba zcela zaplněna. Mechanické části nádoby včetně pohonu mají vůči váženému materiálu velmi vysokou hmotnost, proto nelze zaručit správnost vážení. Dalším problémem je malý prostor v oblasti pod lisem a také přístup k plnicímu otvoru, který by mohl kolidovat s mechanickými částmi vystupujícími z nádoby.

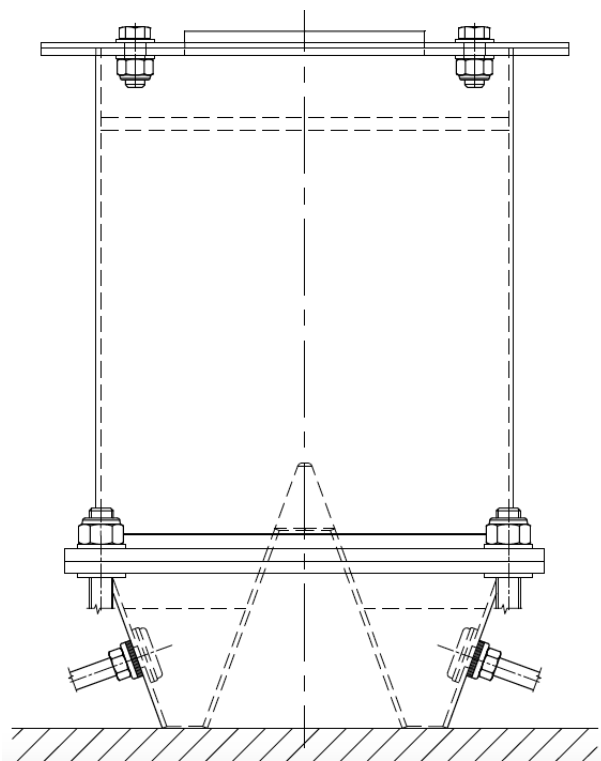


Obr. 16 Návrh mechanicky vyprazdňované nádoby



### 3.2 Pneumatické vyprazdňování dávkovací nádoby

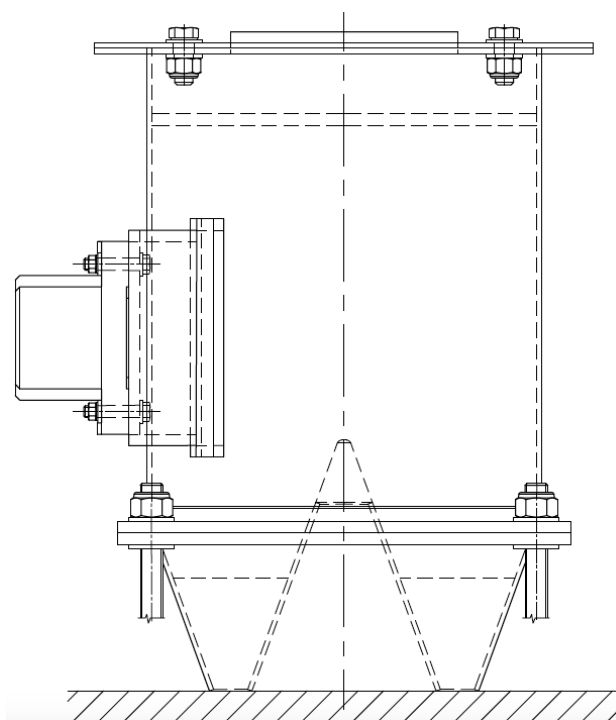
Tato varianta řešení nabízí využití přívodu vzduchu, který zfluidizuje materiál. Provzdušňovací zařízení prostřednictvím tlakového vzduchu rozrušují klenbu materiálu a usnadňují tok materiálu. Provzdušňovací zařízení lze realizovat v podobě provzdušňovacích desek nebo trysek. Tato zařízení jsou dostupná i v menších rozměrech, takže jsou aplikovatelné i na vážicí nádobu. Využití provzdušňovacích zařízení ovšem provází řada problémů. Vzduchová zařízení není vhodné používat v otevřených systémech, protože rozptylují prach do okolního prostředí. Problémová bývá volba optimálního umístění tam, kde vzniká toková porucha. Dále je nutné vhodně zvolit vstupní tlak a množství potřebného vzduchu. Dalším rizikem je zvýšení tlaku a možné porušení zásobníku.



*Obr. 17 Návrh pneumaticky vyprazdňované nádoby*

### 3.3 Vibrační vyprazdňování dávkovací nádoby

Návrh vibrátoru instalovaného na nádobě, který uvádí materiál do pohybu, čímž se usnadní vyprázdnění. Výhodou tohoto řešení je instalace vibrátoru z vnější strany, takže by nepřišel do kontaktu s materiálem. Další výhodou je možnost pořízení vibrátoru kompaktních rozměrů tak, aby nezasahovaly do okolního prostoru a také svou hmotností negativně neovlivňovaly proces vážení. Také plnicí prostor by zůstal bez zásahu. Nevýhodou může být potřeba připojení na vzduchový systém při volbě pneumatického vibrátoru a je nutno ověřit, zda vibrace negativně neovlivní tenzometrické vážení, i když samozřejmě nebude docházet k oběma operacím zároveň. Vibrační zařízení mohou být hlučná a také způsobují namáhání nosné konstrukce.

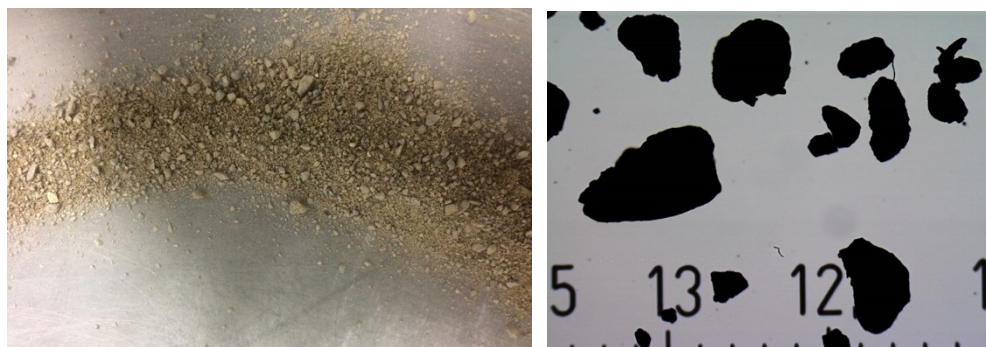


*Obr. 18 Návrh nádoby vyprazdňované vibracemi*

## 4 Měření mechanicko-fyzikálních vlastností materiálu

V rámci zpracovávání diplomové práce byl k dispozici vzorek materiálu – keramická směs, na kterém jsem za pomoci zaměstnanců Laboratoře sypkých hmot provedla několik základních analýz ke zjištění mechanicko-fyzikálních vlastností materiálu.

Práškový materiál nese označení „F40“ a je využíván v technologii výroby žáruvzdorných výrobků a keramických materiálů s využitím ve slévárenství, kamnářství a stavebnictví.



*Obr. 19 Makroskopický a mikroskopický snímek vzorku materiálu*

### 4.1 Úhel vnitřního tření – rotační smyková zkouška

Úhel vnitřního tření vyjadřuje vzájemné tření částic materiálu při pohybu. Jedná se o úhel mezi tangentou tokové křivky a vodorovnou osou.

Rotační smykový stroj je zařízení pro měření tokových vlastností sypkých materiálů. Jeho hlavní předností je neomezená délka smykové dráhy, která je schopna částečně eliminovat problémy s konsolidací vzorku. Schulzův rotační smykový stroj je řízený počítačem a nabízí automatické vyhodnocení měření, které trvá pouze několik minut. Úlohou operátora je naplnění smykové cely, nastavení požadovaného testu v počítačovém programu a vyprázdnění smykové cely po testu. Program poskytuje výsledky měření v grafické podobě, spolu s číselnými hodnotami naměřených výsledků. Graf pracuje s Mohrovými kružnicemi – grafickou reprodukcí napětíového stavu v souřadnicích normálového a smykového napětí ( $\sigma$  -  $\tau$  diagram).

Při měření úhlu vnitřního tření bylo u vzorku jílu aplikováno měření pomocí rotačního smykového stroje Schulze. Měření bylo provedeno s normálovým zatížením v předsmyku 20 kPa. Bylo uskutečněno jedno měření vzorku ve větší cele o průměru 22

cm. Grafický výstup z měření je uveden v příloze D, číselné výsledky jsou uvedeny v tabulce 1.



*Obr. 20 Průběh rotační smykové zkoušky*

*Tabulka 1 Výsledné hodnoty měření rotační smykovou zkouškou*

Úhel vnitřního tření	$\varphi$	[°]	39,8
Úhel vnitřního tření (efektivní)	$\varphi_e$	[°]	43,0
Úhel vnitřního tření (linearizovaný)	$\varphi_{lin}$	[°]	37,0
Tokovost	$ff_c$	[-]	4,18
Hlavní normálové napětí	$\sigma_1$	[Pa]	43 777
Počáteční soudržné napětí	$\tau_c$	[Pa]	2 197
Sypná hmotnost	$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1 528

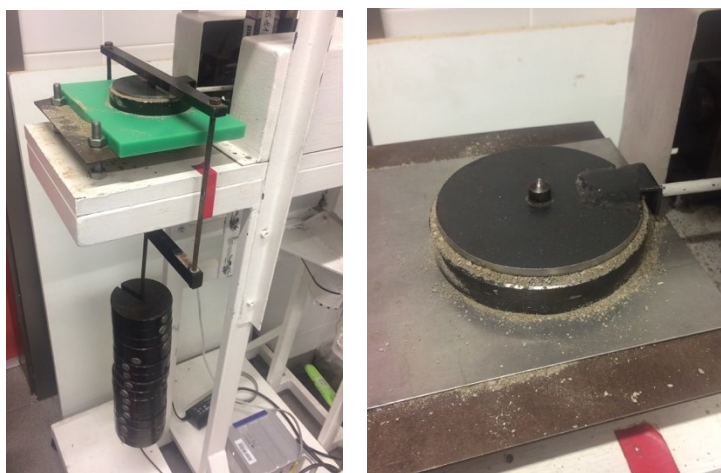
## 4.2 Úhel vnějšího tření

Také úhel stěnového tření, neboli tření mezi práškovitým materiálem a vnějším materiálem použitým například pro zásobník. Měření úhlu vnějšího tření je nejčastěji prováděno na Jenikeho smykovém stroji. Smyková miska je nahrazena deskou z materiálu, na kterém je stěnové měření prováděno.

V průběhu měření vnějšího tření na přímočarém Jenikeho smykovém stroji je postupně navyšováno normálové zatížení  $F_v$  zatěžující smykové víčko a je zaznamenávána smyková síla  $F_s$  potřebná k posunu smykového kroužku s materiálem po desce při jednotlivých hodnotách  $F_v$ .

Pro měření jsem zvolila 3 druhy různých materiálů – nerezový plech, plech 11 373 a plastový materiál Murtfeldt „S“ zelený [FS], který je velmi často využíván jako výstelka

zásobníků a dopravníků. Všechna měření probíhala postupně při zatížení 4, 8, 12 a 16 závažími, každé závaží o hmotnosti 1100 g. Ke hmotnosti závaží je nutné připočítat také hmotnost víka – 214,8 g a závěsu – 1300 g. Vnitřní průměr kroužku je 93 mm, z čehož vyplývá, že hmotnost působí na plochu 6792,9 mm<sup>2</sup>.



*Obr. 21 Průběh zkoušek na Jenikeho smykovém stroji*

Velikost normálového zatížení je ekvivalentní hmotnosti použitých závaží, velikost smykových sil byly vyhodnoceny počítačem. Abych zjistila hodnoty normálového napětí, provedla jsem přepočet dle vzorce:

$$\sigma_w = \frac{F_V}{S_k} \text{ [Pa]} \quad (2)$$

kde:  $S_k = 6792,9 \text{ mm}^2$  ... plocha kroužku měřícího zařízení, na kterou působí závaží

Smykové napětí jsem vypočítala podle vzorce:

$$\tau_w = \frac{F_s}{S_k} \text{ [Pa]} \quad (3)$$

Velikost úhlu vnějšího tření je vyjádřena vztahem:

$$\varphi_w = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_w}{\sigma_w} \right) \text{ [°]} \quad (4)$$

Výsledné hodnoty pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v tabulce 2 – 4.

*Tabulka 2 Hodnoty pro ocelový plech 11 373*

Počet závaží	i [-]	4	8	12	16
Normálové zatížení	$F_V$ [N]	58,02	101,19	144,35	187,52
Smyková síla	$F_S$ [N]	15,37	28,01	42,02	56,25
Normálové napětí	$\sigma_w$ [Pa]	8 542	14 896	21 250	27 605
Smykové napětí	$\tau_w$ [Pa]	2 263	4 123	6 186	8 281

Úhel vnějšího tření keramická směs – ocelový plech:  $\varphi_w^{\text{ocel}} = 15,81^\circ$

*Tabulka 3 Hodnoty pro nerezový plech*

Počet závaží	i [-]	4	8	12	16
Normálové zatížení	$F_V$ [N]	58,02	101,19	144,35	187,52
Smyková síla	$F_S$ [N]	17,58	30,93	47,36	63,11
Normálové napětí	$\sigma_w$ [Pa]	8 542	14 896	21 250	27 605
Smykové napětí	$\tau_w$ [Pa]	2 588	4 553	6 972	9 291

Úhel vnějšího tření keramická směs – nerezový plech:  $\varphi_w^{\text{nerez}} = 17,66^\circ$

*Tabulka 4 Hodnoty pro Murtfeldt plast*

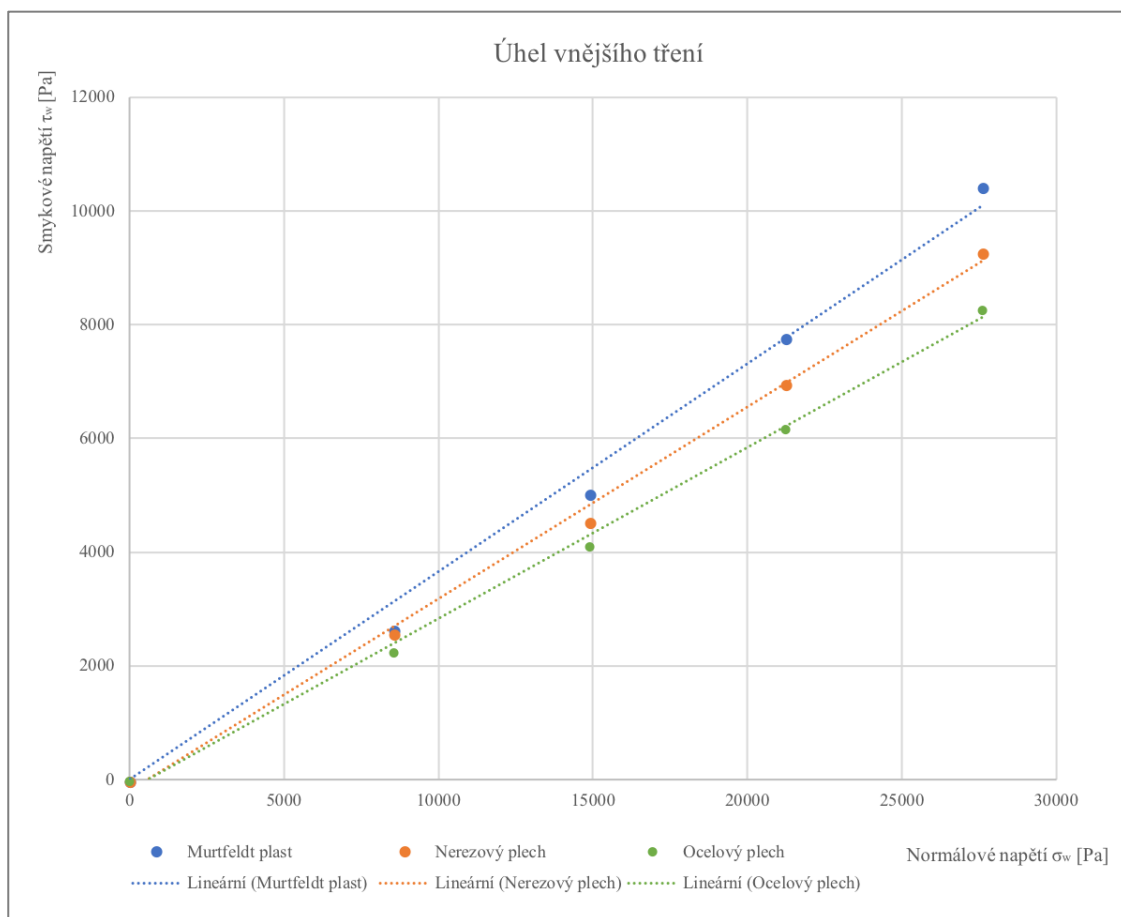
Počet závaží	i [-]	4	8	12	16
Normálové zatížení	$F_V$ [N]	58,024	101,188	144,352	187,516
Smyková síla	$F_S$ [N]	18,00	34,25	52,91	70,90
Normálové napětí	$\sigma_w$ [Pa]	8 542	14 896	21 250	27 605
Smykové napětí	$\tau_w$ [Pa]	2 650	5 042	7 789	10 437

Úhel vnějšího tření keramická směs – Murtfeldt plast:  $\varphi_w^{\text{Murtfeldt}} = 19,20^\circ$

Hodnoty smykových napětí pro odpovídající normálová napětí vynášíme do grafu závislosti  $\tau/\sigma$ . Spojením vzniklých bodů lze získat mezní křivku, nebo spíše mezní přímku, která často prochází počátkem. Přímka svírá s vodorovnou osou  $\sigma$  úhel vnějšího tření  $\varphi_w$ .

Obr. 22 obsahuje graf srovnání výsledků měření pro všechny tři použité materiály.





Obr. 22 Graf výsledných hodnot měření úhlu vnějšího tření

### 4.3 Sypný úhel

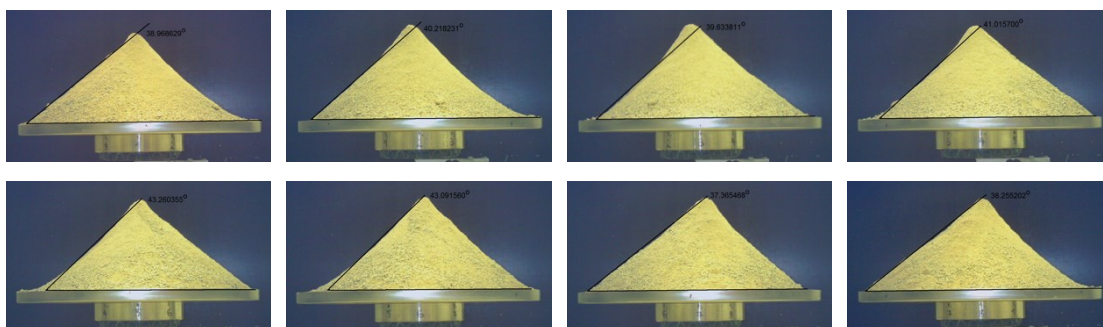
Sypný úhel je charakteristika materiálu, která popisuje tokové chování sypké hmoty. Rozmezí hodnot se teoreticky pohybuje od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  s tím, že s rostoucí hodnotou sypného úhlu roste také kohezivita sypké látky a dochází ke zhoršování tokových vlastností.

Pro toto měření bylo použito validační zařízení patentované Laboratoří sypkých hmot. Zařízení se skládá z rámu, na který je připevněn vibrační podavač, který zajišťuje rovnoměrné nasypávání materiálu na misku, na které se z materiálu vytvoří hromada. Hromadu snímá kamera, která obraz přenáší do počítače a z vytvořených obrázků je možné přímo v programu odměřit úhel svahu. Miska s materiálem je otočná a je na ní vyznačeno 8 bodů, takže je možné měřit svah v rozsahu  $360^\circ$ .



*Obr. 23 Průběh měření sypného úhlu*

Měření jsem provedla dle výše popsaného postupu. Dopadová výška materiálu na misku byla 16,3 cm. Výsledky měření jsou zobrazeny na obr. 24, číselné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.



*Obr. 24 Výsledky měření sypného úhlu*

*Tabulka 5 Výsledky měření sypného úhlu*

Poloha misky	Sypný úhel $\psi_s$
1	38,97°
2	40,22°
3	39,63°
4	41,02°
5	43,26°
6	43,09°
7	37,37°
8	38,26°
<i>Průměr</i>	<i>40,23°</i>

#### 4.4 Vlhkost

Měření vlhkosti vzorku bylo provedeno v externí laboratoři. Zjištěná hodnota vlhkosti vzorku byla 3,95 %.

#### 4.5 Sítová analýza

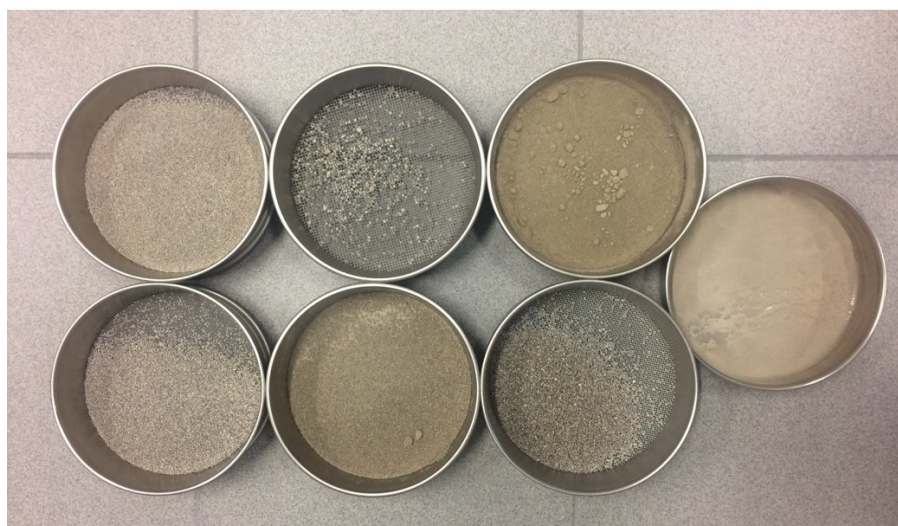
Měření bylo provedeno v zařízení pro sítové prosévání, ke stanovení velikosti částic vzorku. Třídění probíhalo za sucha s rozsahem sít od 250  $\mu\text{m}$  do 2000  $\mu\text{m}$  a amplitudou třídění 2. Měření trvalo 15 minut a byl použit vzorek o hmotnosti 1 kg. Před měřením byla zvážena jednotlivá síta, která byla následně usazena na měřicí zařízení, přičemž úplně nahoře bylo síto s největší okatostí a ta se snižovala až ke spodní misce na nejjemnější částice. Po proběhlém testu byla opět zvážena jednotlivá síta s materiálem. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 6.



*Obr. 25 Příprava k měření*

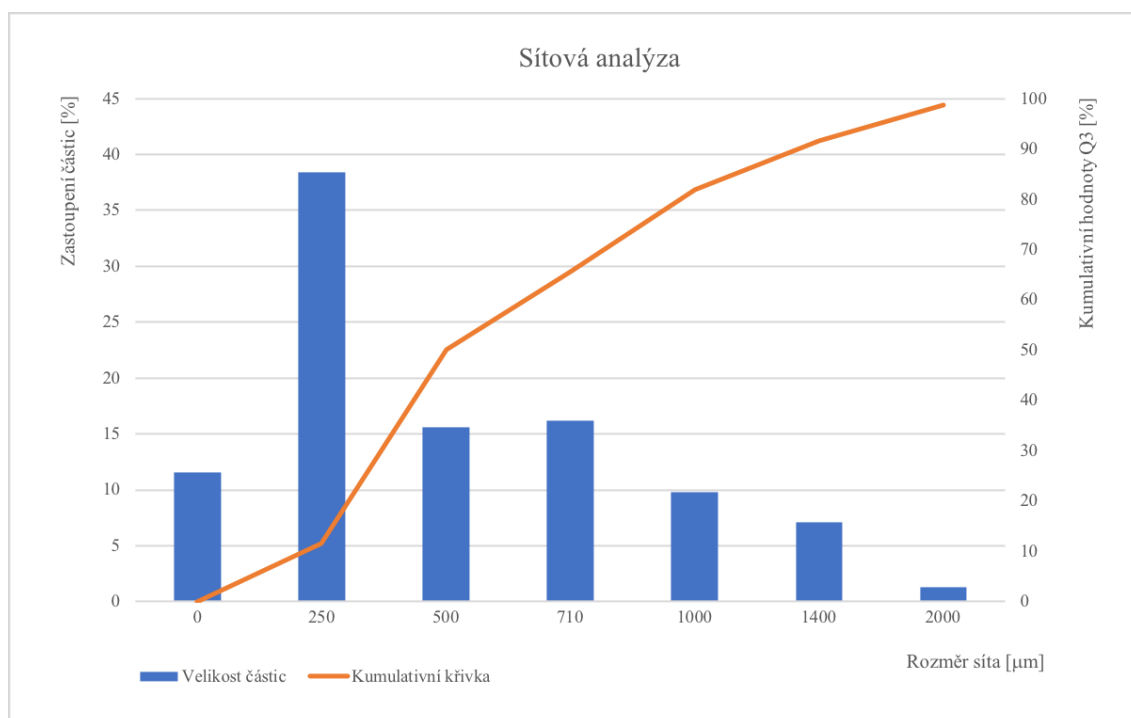
*Tabulka 6 Výsledky měření sypného úhlu*

Síto	Hmotnost prázdného síta [g]	Hmotnost plného síta [g]	Hmotnost protříděného materiálu [g]	Zastoupení zrna [%]	Kumulativní hodnoty Q3 [%]
2000 $\mu\text{m}$	329,94	343,07	13,13	1,3	98,7
1400 $\mu\text{m}$	350,54	421,95	71,41	7,1	91,6
1000 $\mu\text{m}$	321,19	419,07	97,88	9,8	81,8
710 $\mu\text{m}$	325,01	486,90	161,89	16,2	65,6
500 $\mu\text{m}$	273,09	428,82	155,73	15,6	50
250 $\mu\text{m}$	287,05	671,29	384,24	38,4	11,6
Miska	332,47	448,19	115,72	11,6	0



*Obr. 26 Roztříděný materiál*

Výstupem měření je kumulativní křivka distribuce velikosti částic a graf velikosti částic (obr. 27). Tyto výstupy znázorňují kumulativní hodnoty objemu částic ve vzorku v procentech vzhledem k velikosti částic v  $\mu\text{m}$  a distribuci hustoty vzorku v objemu.



Obr. 27 Výsledky sítové analýzy

#### 4.6 Souhrn měření

Na vzorku materiálu bylo provedeno několik základních měření pro zjištění mechanicko-fyzikálních vlastností sypké hmoty. Znalost těchto vlastností slouží k tomu, aby bylo možné co nejefektivněji navrhnout dávkovací zařízení. Velmi důležitým faktorem jsou smykové vlastnosti materiálu. Ty určují, jak snadno se materiál bude pohybovat.

Úhel vnitřního tření chápeme jako míru energetické náročnosti pohybu mezi částicemi a úhel vnějšího tření jako úhel, při kterém začne sypký materiál klouzat po kontaktní ploše. Úhel vnějšího tření byl měřen na třech materiálech, z nichž nejnižší hodnotu úhlu měla kombinace vzorku s ocelovým plechem. Pro konstrukci zařízení však byla po konzultaci se zadavatelem zvolena nerezová ocel, i přesto, že měla v měření vyšší hodnotu úhlu vnějšího tření. Je předpoklad, že nerezová ocel bude mít větší trvanlivost a odolnost než běžná konstrukční ocel.

Další měřenou vlastností byl sypný úhel. Znalost hodnoty sypného úhlu přispívá k vhodné volbě sklonu výsypky u zásobníků. Doporučená podmínka pro úhel stěny dle [17], str. 124 je následující:

$$\beta = \psi_s + (5^\circ \div 15^\circ) \quad [^\circ] \quad (5)$$

$$\beta = 40,23 + 15 \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$\beta = 55,23^\circ$$

Pro běžné materiály se volí hodnota  $\beta = 55^\circ$ . [17]

Tomuto tvrzení vypočtená hodnota odpovídá, avšak byl navržen sklon výsypky  $\beta = 70^\circ$ . To zajistí bezpečný výtok materiálu ze zásobníku i pro případné kohezivnější složení dávkovaného materiálu.

V rámci měření úhlu vnitřního tření byla naměřena i tokovost, která dosáhla hodnoty  $ff_c = 4,18$ . Čím větší je hodnota  $ff_c$ , tím je materiál víc tekoucí. Tokovost materiálu je definována dle [18] následovně:

$ff_c < 1$	netekoucí materiál
$1 < ff_c < 2$	velmi soudržný materiál
$2 < ff_c < 4$	soudržný materiál
$4 < ff_c < 10$	snadno tekoucí materiál
$10 < ff_c$	volně tekoucí materiál

Podle uvedené charakteristiky spadá naměřený vzorek do hraniční oblasti definované jako snadno tekoucí materiál. Ze zkušeností z praxe vyplývá, že materiál je při plnění do forem velmi problematický, tudíž podléhá dalším vlastnostem, které ovlivňují soudržnost materiálu.

Posledním provedeným měřením byla síťová analýza ke zjištění zastoupení velikosti částic vzorku. Největšího procentuálního zastoupení částic dosahovaly zrna odpovídající velikosti 250  $\mu\text{m}$ . Zastoupení částic ve vzorku dosáhlo 38,4 %. Největší částice s rozměrem nad 2 mm byly zastoupeny ve vzorku v objemu 1,3 %. Tímto měřením byl také ověřen požadavek na velikost výpustného otvoru mezikruží o velikosti 15 mm. Měření potvrdilo, že velikost otvoru je dostatečná a nenastane ucpání otvoru i v případě, že dojde ke shluku několika částic s největším naměřeným rozměrem.

Měření mechanicko-fyzikálních vlastností napomáhá k pochopení chování sypkých hmot a zároveň umožňuje konstrukční návrh jakéhokoli dopravního zřízení tak, aby fungovalo správným způsobem.

## 5 Technologický návrh

Jako nejvhodnější způsob vyprazdňování bylo zvoleno vyprazdňování nádoby za pomoci vibrací. Vzhledem k tomu, že se jedná o aplikaci určenou do reálného provozu, je nutné ověřit, zda vibrace budou mít na materiál předpokládaný vliv a dojde k bezproblémovému vysypání veškerého materiálu z nádoby. K tomuto účelu bude v následujících krocích navržena zjednodušená nádoba na materiál, která bude simulovat nádobu do provozu. Na této nádobě bude následně zkoušeno, zda budou vibrace pozitivně ovlivňovat tok materiálu z nádoby.

### 5.1 Zjednodušený návrh nádoby

Velikost výpustného otvoru nádoby je dána tvarem i rozměrem protikusu, tj. násypným otvorem formy lisu. Vzhledem k tomu, že forma lisu má několik typů (pro různé rozměry výrobků), byl pro zjednodušení zvolen jeden typ formy, pro který bude následně proveden celý návrh nádoby. Pro realizaci bude navržena sada nádob tak, aby odpovídaly všem typům výrobků. Dávkovací nádoba bude dimenzována pro trn o průměru 80 mm. Velikost plnicího otvoru má tvar mezikruží, s vnějším průměrem 115 mm a vnitřním průměrem 85 mm. Tento rozměr také odpovídá požadavku, aby minimální šterbina mezikruží byla 15 mm. Je vhodné, aby nádoba měla mírný přesah, aby nedocházelo k ulpívání materiálu na trnu. Předepsaná dávka materiálu „F40“ je 5 kg, maximální dávka je 9 kg, což znamená, že je nutné zjistit maximální potřebný objem nádoby:

$$V_{nMAX} = \frac{m_{mMAX}}{\rho_s} [m^3] \quad (6)$$

kde:  $m_{mMAX} = 9 \text{ kg}$  ... maximální hmotnost materiálu naváženého do nádoby

$\rho_s = 1528 \text{ kg} \cdot m^{-3}$  ... sypná hmotnost materiálu

$$V_n = \frac{9}{1528} m^3$$

$$V_n = 5,89 \cdot 10^{-3} m^3 = 5,89 \text{ l}$$

Objem pro předepsanou hmotnost materiálu:

$$V_n = \frac{m_m}{\rho_s} [m^3] \quad (7)$$

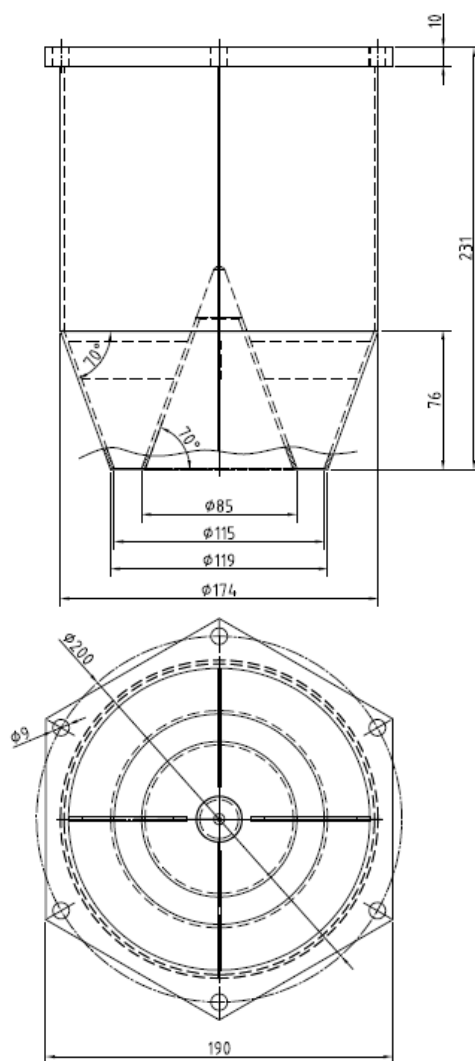
kde:  $m_m = 5 \text{ kg}$

... předepsaná hmotnost materiálu

$$V_n = \frac{5}{1528} \text{ m}^3$$

$$V_n = 3,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 3,27 \text{ l}$$

Na zjednodušené nádobě byl proveden experiment vyprazdnitelnosti pomocí vibrací. Nádoba ve spodní části obsahuje pasivní prvek ve tvaru kužele, který je dán tvarem výpustného otvoru - mezikruží, ale také působí jako rozrušovač materiálu. Velikost nádoby je určena pro dávku 5 kg. Nádoba prozatím neobsahuje uzavírací mechanismus, ani vibrátory. Nádoba byla umístěna na rámu a ten byl následně usazen na měřicí stand Laboratoře sypkých hmot, kde byl experiment proveden. Rozměrový náčrtek nádoby je uveden na obr. 28.

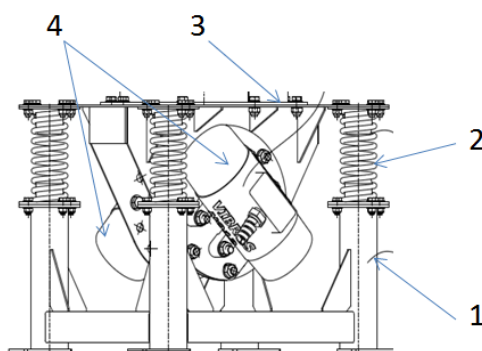


Obr. 28 Rozměrový návrh nádoby



## 5.2 Zkouška vlivu vibrací na vyprázdnění nádoby

V rámci této zkoušky byl posuzován vliv vibrací na účinnost vyprazdňování dávkovací nádoby. Experiment byl proveden na měřicím standu se dvěma vibromotory NO12 o výkonu  $2 \times 0,15$  kW, které jsou vůči sobě pootočené o  $90^\circ$ . Poloha takto umístěných vibromotorů je nejúčinnější, protože dochází k pohybu kolem osy Z a zároveň k rotaci kolem osy Z, díky čemuž dochází k harmonickému pohybu ve šroubovici. Při vyprazdňování nádoby vyvolání takového stavu požadujeme, směr vibrací je soustředěn pouze kolem osy zásobníku. Problematice vibrací se budu blíže věnovat v kapitole 6.1. Měřicí aparatura se sestávala z: počítače, experimentálního standu, váhy, frekvenčního měniče a nádoby umístěné na rámu.



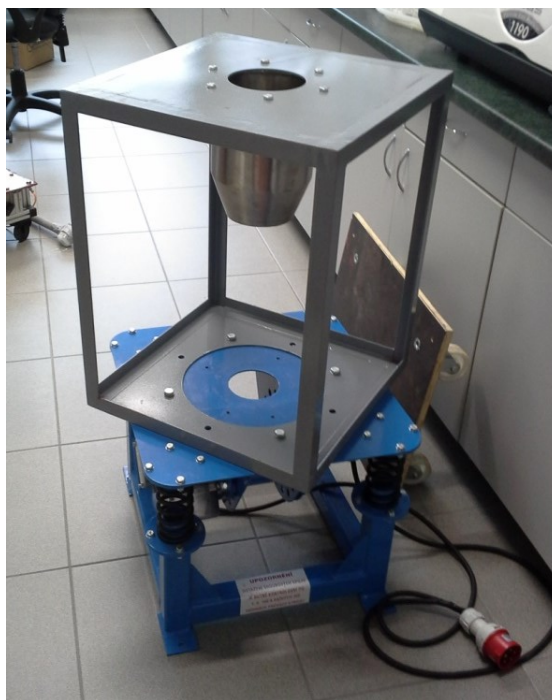
Obr. 29 Schéma standu

1 - Pevný rám, 2 - Pružiny, 3 - Vibrující část, 4 - Dvojice vibromotorů

Nastavení budící síly  $F_B$  v závislosti na frekvenci kmitání  $f$  je uvedeno v tabulce 7. Celková tuhost čtyř pružných elementů je  $k_p = 123 \text{ N.mm}^{-1}$ . Do dávkovací nádoby byl nasypáván vzorek písku o hmotnosti 4 kg.

Tabulka 7 Nastavení provozních režimů pro jednotlivá měření

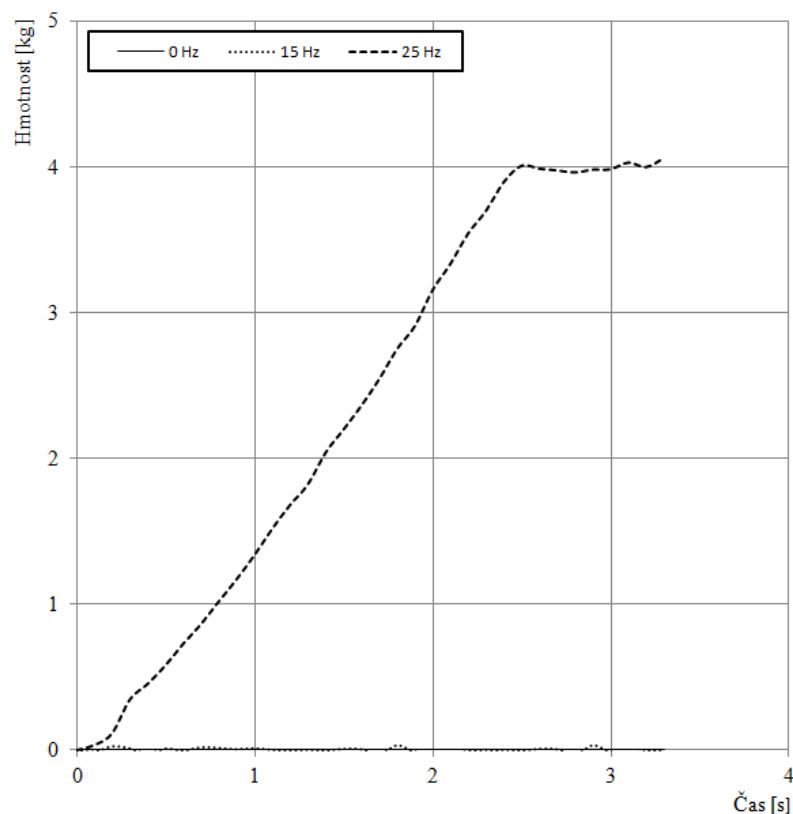
Frekvence	$f$ [Hz]	0	15	25
Otáčky	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	0	852	1420
Budící síla	$F_B$ [N]	0	325	904



*Obr. 30 Rám s nádobou umístěný na standu*

Během experimentu byly provedeny 3 měření. Průběhy vyprazdňování jsou zaznamenány na obr. 31. Během prvního měření bylo sledováno vyprazdňování nádoby bez použití vibrací. Bylo zjištěno, že materiál je natolik soudržný, že se nádoba nedokáže vyprázdnit pouze za působení gravitace. Během druhého měření byly nastaveny vibrace o frekvenci 15 Hz, čemuž odpovídá budicí síla 325 N. Ani v tomto případě se materiál nedokázal uvolnit z nádoby a celý objem zůstal v zásobníku. Následně byla zvýšena hodnota vibrací na frekvenci 25 Hz, které odpovídá budicí síla o velikosti 904 N. Během tohoto měření došlo k plynulému a stabilnímu vysypání materiálu z nádoby, bez známek rázových účinků. Doba vyprázdnění byla změřena okolo 2,5 s.

Tímto experimentálním měřením bylo potvrzeno, že vibracemi lze dosáhnout vyprázdnění nádoby a naplnění formy lisu. Důležité bude v dalších krocích zajistit nejvhodnější nastavení vibrací.



*Obr. 31 Průběh vyprazdňování nádoby*

### 5.3 Konstrukční návrh dávkovacího zařízení

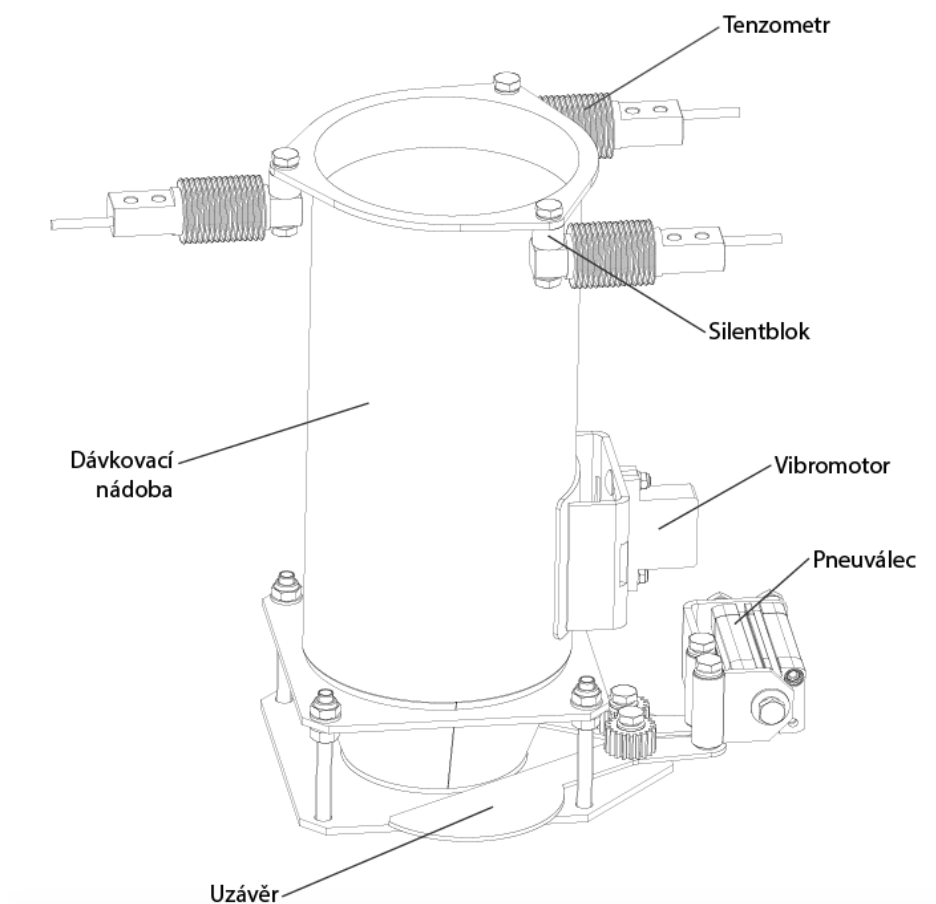
Vzhledem k tomu, že zkouška potvrdila vhodnost využití vibrací, bude v následujících krocích popsán postup návrhu dávkovacího zařízení. Prototyp dávkovacího zařízení bude opět podroben zkouškám vyprazdnitelnosti.

Zařízení je tvořeno dvěma nádobami, z nichž každá bude plnit jednu komoru lisu. Volba některých rozměrů byla nastíněna už během zjednodušeného návrhu v kapitole 5.1. Objem nádoby je tentokrát přizpůsoben maximálnímu dávkovanému objemu – 9 kg. Během zkoušení se bude mimo jiné měřit čas vyprázdnění, aby se zjistilo, zda dojde k vysypání materiálu během zadané doby.

Dávkovací nádoba je vybavena statickým kuželovým prvkem, který se spodní hrnou nádoby tvoří otvor ve tvaru mezikruží. Rozměry jsou dimenzovány pro trn lisu o průměru 80 mm. Každá nádoba je opatřena pneumatickým kuličkovým vibrátorem, který je instalován na vnější stěně nádoby. Výrobce uvádí, že typ vibromotoru je vhodný pro využití v oblasti práškových materiálů. [19] Každá z nádob je opatřena vlastním uzavíracím mechanismem. Mechanismus pracuje na nůžkovém principu a otevírání je realizováno pneumatickým válcem.

Horní část nádoby je ve třech bodech osazena tenzometry – ohybovými snímači zatížení Z6FC3. Vždy jeden snímač má nominální kapacitu 20 kg, v třídě přesnosti C3. Nad tenzometry jsou umístěny silentbloky.

Nádoby jsou umístěny na společném rámu a jsou stavitelné tak, aby bylo možné měnit osovou vzdálenost nádob.



*Obr. 32 Náskres sestavy dávkovací nádoby*

## 6 Technologické a pevnostní výpočty

V této kapitole budou provedeny výpočty, které ověří správnost zvolených komponentů, nebo povedou k určení parametrů, které usnadní volbu komponentů z katalogu výrobců.

### 6.1 Teoretický rozbor vibrací

Za vibrace, též mechanické kmitání, označujeme pohyb pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem rovnovážné polohy. Tvarem kmitu rozumíme křivku, po které se pohybuje bod umístěný na rovině kmitání. Rozlišujeme rovinné a prostorové tvary kmitů, které vznikají při chodu vibračních zařízení.

Rovinné tvary kmitů:

- přímočarý
- kruhový
- eliptický
- obecný

Existuje spousta vibračních zařízení, které kmitají prostorově. Častým tvarem kmitu je pak prostorová šroubovice. Šroubovice je prostorová křivka ležící na válcové ploše, kterou lze charakterizovat následujícími rovnicemi:

$$x = r_{\S} \cdot \sin \varphi_{\S} \quad [m] \quad (8)$$

$$y = r_{\S} \cdot \cos \varphi_{\S} \quad [m] \quad (9)$$

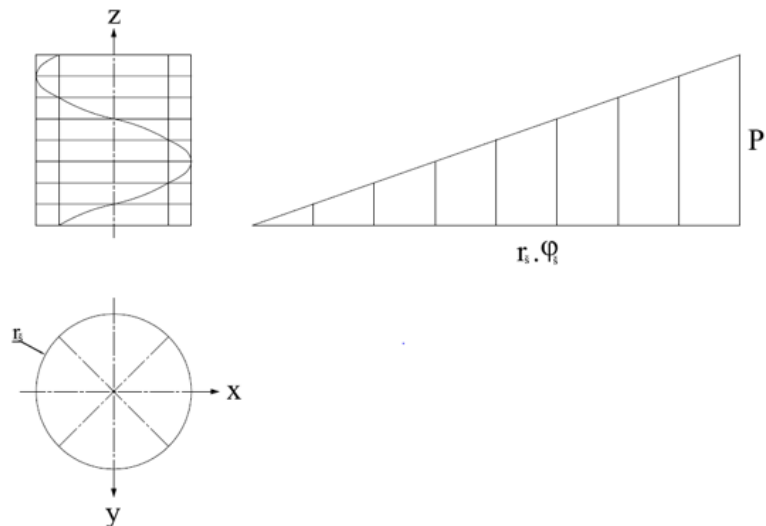
$$z = P \quad [m] \quad (10)$$

kde:  $r_{\S} [m]$  ... poloměr pohybové kružnice šroubovice

$\varphi_{\S} [-]$  ... fázové posunutí v intervalu  $(0; 2\pi)$

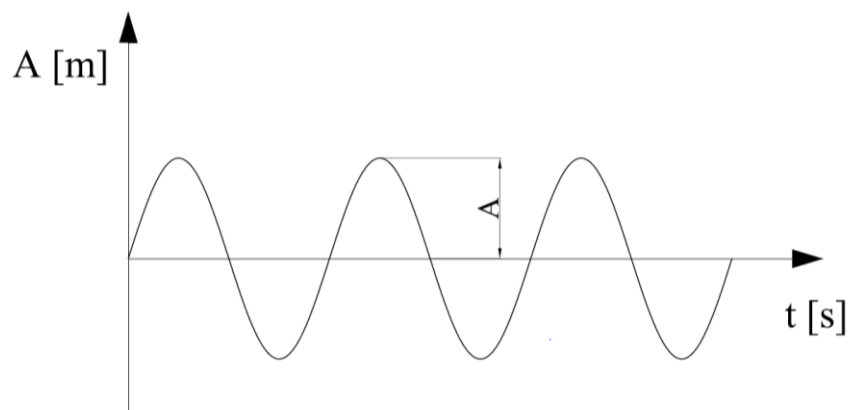
$P [m]$  ... stoupání šroubovice

Znázornění průběhu šroubovice je na obr. 33.



*Obr. 33 Průběh šroubovice*

Amplituda kmitu  $A$  je maximální výchylka ze střední polohy do krajní polohy u přímočarého kmitu a poloměr opisované části kružnice u kruhového kmitu. Amplituda vyjadřuje polovinu rozkmitu.



*Obr. 34 Amplituda přímočarého kmitu*

Harmonické kmitání je periodický pohyb, kdy se okamžitá hodnota výchylky  $A$  [m] mění v čase  $t$  [s] podle goniometrické funkce sinus.

Pracovní frekvence udává počet kmitů zařízení za 1 sekundu. Frekvence vibračních zařízení se volí dle požadované technologické funkce.

## 6.2 Výpočet vibromotoru

Pro nádobu byl zvolen pneumatický kuličkový vibrátor OLI S 8. Vibrací se u těchto zařízení dosahuje rotující kuličkou, která je poháněna proudem stačeného vzduchu. Frekvence je závislá na vstupním tlaku. Výhodou těchto vibrátorů je, že nevyžadují žádnou údržbu. Hlavní parametry vibromotoru jsou uvedeny v tabulce 8.

*Tabulka 8 Hlavní parametry vibromotoru [19]*

Přívodní tlak vzduchu	Otáčky	Maximální odstředivá síla
[bar]	[min <sup>-1</sup> ]	[kg]
2	25 500	13
4	31 000	26
6	35 000	36



*Obr. 35 Pneumatický kuličkový vibrátor OLI S 8 [19]*

Na technickém listu zvoleného vibrátoru je uvedena maximální odstředivá síla v kilogramech. Pro následující výpočty je potřeba převést tuto sílu na jednotku Newton. Kontaktovala jsem technickou podporu výrobce a bylo mi sděleno, že požadovanou hodnotu získám jednoduchým přepočtem pomocí tíhového zrychlení dle následujícího vzorce:

$$F_{Omax} = F_{Omax}^{[kg]} \cdot g \text{ [N]} \quad (11)$$

kde:  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  ... tíhové zrychlení

*Tabulka 9 Hodnoty odstředivé síly v převedených jednotkách*

Maximální odstředivá síla	Maximální odstředivá síla
[kg]	[N]
13	127,53
26	255,06
36	353,16

Následující výpočty jsou provedeny dle vzorců [20], str. 67 – 73.

Úhlová frekvence vibromotoru:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_v \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (12)$$

kde:  $n_v = 583,34 \text{ s}^{-1}$  ... otáčky vibromotoru při tlaku vzduchu 6 bar

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 583,34 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\omega = 3665,19 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Fázový posun:

$$\varphi = \omega \cdot t \text{ [rad]} \quad (13)$$

Obecná rovnice harmonického pohybu - momentální výchylka:

$$A_0 = A \cdot \sin (\omega \cdot t) \text{ [m]} \quad (14)$$

kde:  $A$  ... maximální výchylka - amplituda

Výpočet hmotnosti všech vibrujících částí:

$$m_c = m_k + m_m \text{ [kg]} \quad (15)$$

kde:  $m_k = 5,9 \text{ kg}$  ... hmotnost vibrující konstrukce včetně hmotnosti vibromotoru

$$m_m = 9 \text{ kg} \quad \dots \text{ hmotnost materiálu}$$

$$m_c = 5,9 + 9 \text{ kg}$$

$$m_c = 14,9 \text{ kg}$$



Hodnota charakterizuje hmotnost, kterou musí vibromotor uvést do kmitavého pohybu a dále tento pohyb udržet v konstantním stavu.

Maximální velikost budící síly:

$$F_{Bmax} = m_c \cdot A \cdot \omega^2 [N] \quad (16)$$

Maximální odstředivá síla vibromotoru:

$$F_{0max} = m_n \cdot r \cdot \omega^2 [N] \quad (17)$$

kde:  $m_n$  [kg] ... hmotnost nevývažku – kuličky vibromotoru

$r$  [m] ... poloměr rotace těžiště nevývažku

Velikost odstředivé síly vibromotoru znám, proto mohu provést výpočet skutečné amplitudy kmitání vibrujících částí:

$$F_{Bmax} = F_{0max} \quad (18)$$

$$m_c \cdot A_{sk} \cdot \omega^2 = F_{0max} \quad (19)$$

$$A_{sk} = \frac{F_{0max}}{m_c \cdot \omega^2} [m]$$

$$A_{sk} = \frac{353,16}{14,9 \cdot 3665,19^2} m$$

$$A_{sk} = 0,000001764 m = 0,002 mm$$

Amplituda kmitání vyjadřuje pootočení - pohyb konstrukce během vibrací. Požadujeme minimální amplitudu, aby nedošlo k negativnímu ovlivnění tenzometrů.

### 6.3 Výpočet potřebné tuhosti pružných elementů

Pružné elementy umožňují zařízení jeho kmitavý pohyb a současně brání přenosu dynamických sil do okolního prostředí. Pro určení optimální tuhosti pružných elementů je důležité určit, ve které oblasti kmitání bude zařízení pracovat.

Rozlišujeme tři oblasti, ve kterých může zařízení pracovat. Tyto oblasti jsou charakterizovány koeficientem naladění  $z$ . [20]

a) Pod – rezonanční oblast

$$z = \frac{\omega}{\omega_0} < 1 [-] \quad (20)$$

b) Rezonanční oblast

$$z = \frac{\omega}{\omega_0} = 0,85 \div 0,95 [-] \quad (21)$$

c) Nad – rezonanční oblast

$$z = \frac{\omega}{\omega_0} > 1 \div 5 [-] \quad (22)$$

kde:  $\omega_0 [rad \cdot s^{-1}]$  ... vlastní kruhová frekvence zařízení

Pro návrh zařízení volím nad - rezonanční oblast s koeficientem naladění  $z = 3$ . Pomocí upraveného vzorce (18) vypočítám vlastní kruhovou frekvenci zařízení.

$$\omega_0 = \frac{\omega}{z} [rad \cdot s^{-1}] \quad (23)$$

$$\omega_0 = \frac{3665,19}{3} rad \cdot s^{-1}$$

$$\omega_0 = 1221,73 rad \cdot s^{-1}$$

Výpočet potřebné tuhosti všech pružných elementů:

$$k_p = m_k \cdot \omega_0^2 [N \cdot m^{-1}] \quad (24)$$

$$k_p = 5,9 \cdot 1221,73^2 N \cdot m^{-1}$$

$$k_p = 8\,806\,482,7 N \cdot m^{-1}$$

Výpočet potřebné tuhosti jednoho pružného elementu:

$$k_{p1} = \frac{k_p}{n_p} [N \cdot m^{-1}] \quad (25)$$

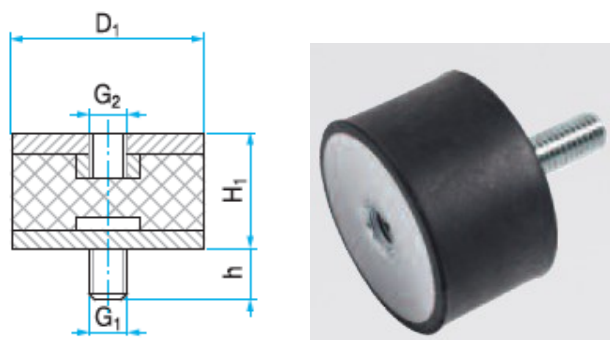
kde:  $n_p = 3$  ... počet pružných elementů zařízení

$$k_{p1} = \frac{8806482,7}{3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$k_{p1} = 2\,935\,494,2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

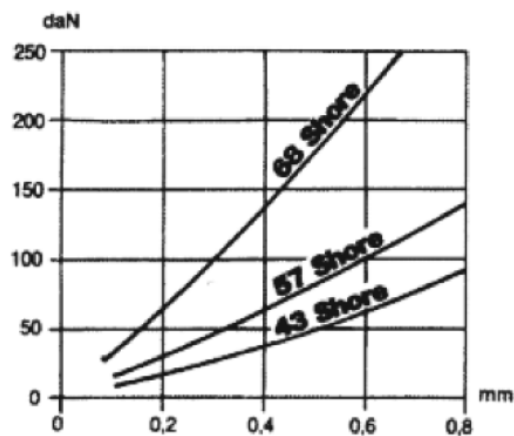
Z vypočtené tuhosti pružného elementu zvolím odpovídající pružný element - silentblok o dané charakteristice.

Z katalogu výrobce Rubena volím silentblok 50/20 - M8x15 (typ 2) [21]



Obr. 36 Silentblok fy Rubena [21]

Z charakteristiky volím nejvyšší tvrdost 68 Shore. Dle této charakteristiky je tuhost silentbloku  $k_{ps} = 3\,125\,000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ .



Obr. 37 Charakteristika silentbloku [21]

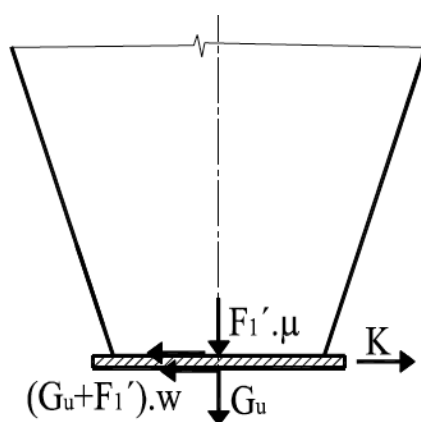
Kontrola, zda zvolený silentblok odpovídá požadované hodnotě výpočtu:

$$k_{ps} \geq k_p [N \cdot m^{-1}] \quad (26)$$

$$3\,125\,000 > 2\,935\,494,2 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

#### 6.4 Výpočet odporu při otevírání uzávěru

Tento výpočet ověří, zda zvolený otevírací mechanismus překoná odpor, kterým působí materiál na uzávěr. Výpočet je proveden dle postupu pro určení velikosti odporu pro vodorovný uzávěr plochý dle [17], str. 131 – 132.



Obr. 38 Síly působící na vodorovný uzávěr [17]

Součinitel vnitřního tření:

$$f_e = \tan \varphi [-] \quad (27)$$

kde:  $\varphi = 39,8^\circ$

... úhel vnitřního tření materiálu

$$f_e = \tan 39,8$$

$$f_e = 0,83$$

Sypná tíha materiálu:

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g [N] \quad (28)$$

kde:  $\rho_s = 1528 \, kg \cdot m^{-3}$

... sypná hmotnost materiálu

$$\gamma_s = 1528 \cdot 9,81 \text{ N}$$

$$\gamma_s = 14\,989,7 \text{ N}$$

Hydraulický poloměr:

Tvar výpustného otvoru nádoby je nestandartní, mezikruží se běžně u zásobníků nepoužívá. Pro výpočet použiji vzorec hydraulického poloměru pro kruhovou výpust'. Výpočet provedu jak pro vnější, tak pro vnitřní průměr a následně od sebe hodnoty odečtu.

$$R_1 = \frac{S}{o} [m] \quad (29)$$

Obsah vnějšího otvoru o průměru 115 mm:

$$S_{115} = \pi \cdot r_{115}^2 [m^2] \quad (30)$$

$$S_{115} = \pi \cdot 0,0575^2 m^2$$

$$S_{115} = 0,0104 m^2$$

Obvod vnějšího otvoru o průměru 115 mm:

$$o_{115} = 2\pi \cdot r_{115} [m] \quad (31)$$

$$o_{115} = 2\pi \cdot 0,0575 m$$

$$o_{115} = 0,3613 m$$

Hydraulický poloměr vnějšího otvoru o průměru 115 mm.

$$R_{115} = \frac{S_{115}}{o_{115}} [m] \quad (32)$$

$$R_{115} = \frac{0,0104}{0,3613} m$$

$$R_{115} = 0,0288 m$$

Obsah vnitřního otvoru o průměru 85 mm:

$$S_{85} = \pi \cdot r_{85}^2 [m^2] \quad (33)$$

$$S_{85} = \pi \cdot 0,0425^2 m^2$$

$$S_{85} = 0,00567 m^2$$

Obvod vnitřního otvoru o průměru 85 mm:

$$o_{85} = 2\pi \cdot r_{85} [m] \quad (34)$$

$$o_{85} = 2\pi \cdot 0,0425 m$$

$$o_{85} = 0,2671 m$$

Hydraulický poloměr vnitřního otvoru o průměru 85 mm.

$$R_{85} = \frac{S_{85}}{o_{85}} [m] \quad (35)$$

$$R_{85} = \frac{0,00567}{0,2671} m$$

$$R_{85} = 0,0212 m$$

Rozdíl hydraulických poloměrů:

$$R_1 = R_{115} - R_{85} [m] \quad (36)$$

$$R_1 = 0,0288 - 0,0212 m$$

$$R_1 = 0,0076 m$$

Koeficient sypnosti:

$$k = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} [-] \quad (37)$$

$$k = \frac{1 - \sin 39,8}{1 + \sin 39,8}$$

$$k = 0,219$$

Tlak sypkého tělesa na uzávěr:

$$\sigma_{1u} = \frac{\gamma_s \cdot R_1}{k \cdot f_e} [Pa] \quad (38)$$

$$\sigma_{1u} = \frac{14989,7 \cdot 0,0076}{0,219 \cdot 0,83} \text{ Pa}$$

$$\sigma_{1u} = 626,7 \text{ Pa}$$

Jansenova síla ve vertikálním směru:

$$F'_1 = \sigma_{1u} \cdot S_m \text{ [N]} \quad (39)$$

kde:  $S_m = 0,00473 \text{ m}^2$  ... plocha mezikruží

$$F'_1 = 626,7 \cdot 0,00473 \text{ N}$$

$$F'_1 = 2,96 \text{ N}$$

Součinitel tření mezi materiálem a uzávěrem:

$$\mu = \tan \varphi_w^{\text{nerez}} [-] \quad (40)$$

$$\mu = \tan 17,66$$

$$\mu = 0,32$$

Tíha uzávěru:

$$G_u = m_u \cdot g \text{ [N]} \quad (41)$$

kde:  $m_u = 2,82 \text{ kg}$  ... hmotnost uzávěru

$$G_u = 2,82 \cdot 9,81 \text{ N}$$

$$G_u = 27,66 \text{ N}$$

Odpor při otevírání uzávěru:

$$K_u \geq F'_1 \cdot \mu + (F'_1 + G_u) \cdot w \text{ [N]} \quad (42)$$

kde:  $w = 1,4$  ... měrný odpor proti pohybu (způsob vedení materiálu) – hodnotu jsem určila z vlastních studijních poznámek

$$K_u \geq 2,96 \cdot 0,32 + (2,96 + 27,66) \cdot 1,4 \text{ N}$$

$$K_u \geq 43,81 \text{ N}$$

Velikost odporu  $K_u$  se volí o 15 ÷ 40 % větší, než je vypočítaná hodnota. [17]

Volím navýšení  $K_u$  o 40 %:

$$K_u = 43,81 \cdot 1,4 \text{ N}$$

$$K_u = 61,34 \text{ N}$$

Tato hodnota vyjadřuje odpor, který musí překonat pohon otevíracího mechanismu, aby došlo k bezproblémovému otevření.

Pro pohon uzávěru byl v předchozí kapitole zvolen pneumatický pohon - kompaktní dvojčinný válec výrobce FESTO, typ ADN-32-50-I-P-A. Základní parametry pohonu jsou uvedeny v tabulce 10.

*Tabulka 10 Základní parametry zvoleného pneumatického válce [22]*

Průměr pístu	[mm]	32
Zdvih	[mm]	50
Teoretická síla při 6 barech, pohyb vpřed	[N]	483
Teoretická síla při 6 barech, pohyb vzad	[N]	415

Z parametrů pohonu vyplývá, že síla vyvolávaná válcem několikanásobně převyšuje vypočítanou hodnotu odporu. K otevírání a zavírání uzávěru nádoby při provozu by tedy mělo docházet bez problémů.



*Obr. 39 Kompaktní pneumatický válec FESTO [22]*



## 7 Provozní zkoušení dávkovacího zařízení

Cílem provozních zkoušek bylo ověření funkce dávkovacího zařízení při plnění lisovací formy. Zkoušení dávkovacího zařízení dle návrhu uvedeného v předchozích kapitolách bylo provedeno v prostorách Technologického centra Ostrava při VŠB-TUO. Byl dodán fyzický prototyp dávkovacího zařízení a rovněž lisovací forma vč. komponentů a také testovaný materiál. Vstupní podmínkou byl maximální čas plnění do 10 s, dále pak dovolená hmotnostní ztráta do max. výše 10 g pro jednu nádobu.

### 7.1 Příprava zkoušení

Byla dodána lisovací forma, která se skládá z pevného rámu a měnitelného trnu. Dohromady je vytvořena dutina ve tvaru mezikruží pro výrobu tvarovek. Dávkovací zařízení bylo dimenzováno pro trn o průměru 80 mm.

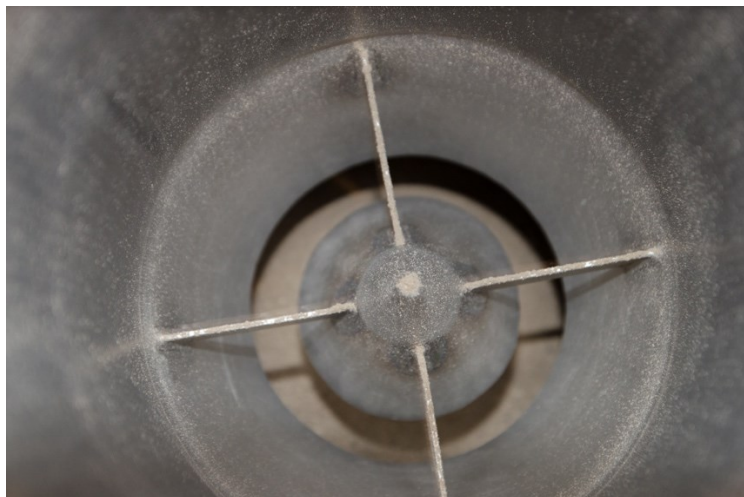


*Obr. 40 Sestava dávkovacího zařízení a lisovací formy*

Dávkovací zařízení společně s testovacím držákem bylo umístěno na lisovací formě a osy nádob byly vycentrovány s osami trnu. Statický prvek nádoby mírně překrývá trn, aby nedošlo k zachycení materiálu na rovné ploše trnu. Součástí dávkovacího zařízení jsou tenzometry, ty ovšem během zkoušení nebyly využívány. Veškeré komponenty poháněné stlačeným vzduchem byly připojeny ke zdroji vzduchu, jehož hodnota tlaku byla nastaveny na 6 barů.

## 7.2 Průběh zkoušek

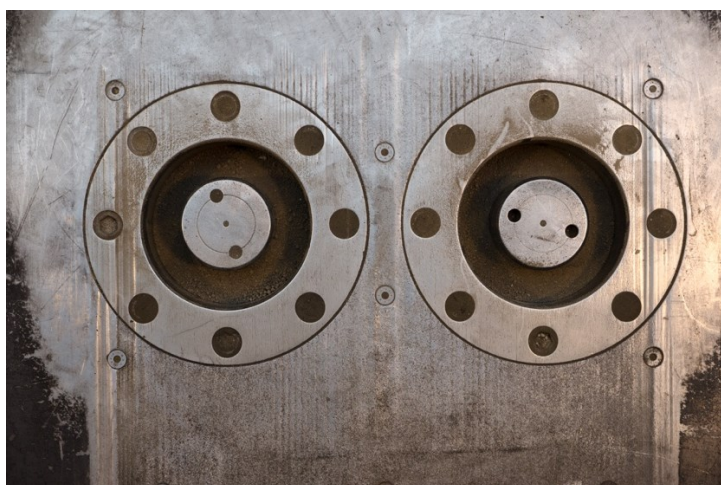
První zkouška proběhla s materiálem o dávce 5 kg. Po otevření uzávěru a spuštění vibromotorů došlo ke kontinuálnímu vyprázdnění obou nádob do forem. Doba vyprázdnění se pohybovala okolo 4 s. Po vyprázdnění nádob bylo zjištěno, že na vnitřním plášti zásobníku a na plášti statického prvku ulpěly jednotlivá zrna materiálu. Hmotnostní ztráta těchto nálepů se pohybuje do předepsaných 10 g. Otevírací mechanismus je funkční, ovšem při rychlém otevření vynesl velmi malé množství materiálu, které se dostalo i mezi pohyblivé části a bez pravidelného ofukování by mohlo dojít k zablokování mechanismu.



*Obr. 41 Pohled do nádoby po vyprázdnění materiálu*

Během zkoušek byl ověřován také vliv polohy vibromotoru na účinnost vyprazdňování materiálu. Bylo zjištěno, že nejideálnější poloha vibrátoru je při natočení o 45° vůči ose nádoby. V tomto případě na vnitřním plášti nádoby zůstávalo nejméně zachyceného materiálu.

Další zkouška proběhla pro dávku materiálu 9 kg. V tomto případě došlo ke kontinuálnímu vyprázdnění nádob v čase 7,5 s. Čas tedy plně odpovídá zadání.



*Obr. 42 Půdorysný pohled na formy po naplnění materiálem*

Během zkoušek byla pozorována také vodorovnost hladiny materiálu ve formách. Byla zjištěna výšková nerovnoměrnost nasypání, kdy na straně vibromotoru byl zásyp formy o cca 10 mm vyšší než na straně opačné.

### 7.3 Zhodnocení provedených zkoušek

Provozní zkoušky ukázaly, že zařízení je funkční a je schopno plnit formy lisu podle zadání. Během zkoušek došlo ke zjištění drobných nedostatků a je potřeba provést drobné konstrukční úpravy zařízení.

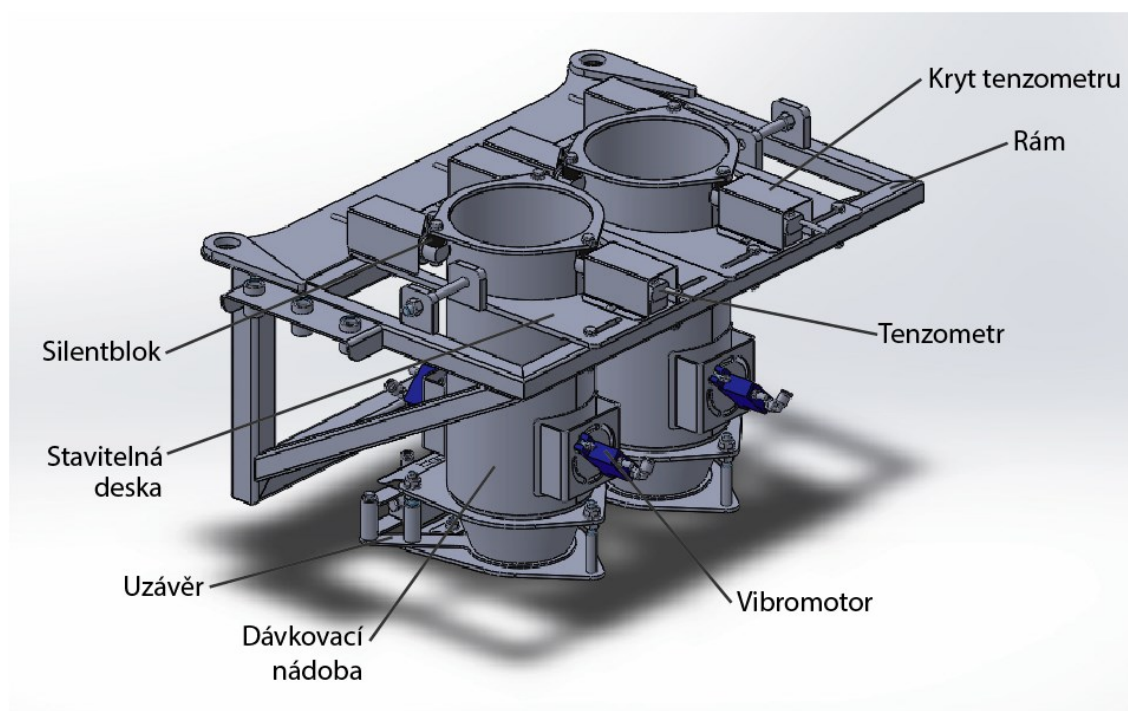
- Zvolit vhodnější povrchovou úpravu vnitřních plášťů zásobníků a vnějších ploch statických kuželů,
- u držáků vnitřních kuželů zabrousit hrany tak, aby se omezilo zachytávání zrn materiálu na plochách,
- zakrytovat pohyblivé části uzavíracího mechanismu, případně zajistit ofuk materiálu,
- pro zajištění vodorovného zaplnění hladiny přidat druhý pneumatický pohon na protější stranu zásobníku tak, aby byly oba vibromotory vůči sobě pootočený o 90°.

## 8 Technický popis zařízení

Navržené dávkovací zařízení je tvořeno dvěma dávkovacími nádobami s pasivním prvkem kuželového uvnitř každé nádoby. Dávkovací nádoba má válcový tvar, který se ve spodní části mění v komolý kužel. Pasivní prvek tvoří se dnem nádoby výpustný otvor ve tvaru mezikruží tak, aby otvor lícovал se tvarem lisovací formy.

Vnější stěna nádoby je osazena dvěma vibromotory, které leží na protějších stranách a jsou vůči sobě pootočený o 90°. Na vrchní část nádoby jsou umístěny tři silentbloky a pod každým silentblokem je instalován tenzometr. Výpustný otvor nádoby kryje uzavírací šoupátkový mechanismus. Ten je poháněn pneumatickým válcem. Všechny části mechanismu jsou zakrytovány tak, aby byl minimalizován kontakt s vynášeným materiálem. Krytem jsou opatřeny také všechny tenzometry.

Každá z nádob je usazena v desce, která je následně instalována v rámu. Desky jsou v rámu stavitelné, aby bylo možné měnit osovou vzdálenost nádob. V rámu jsou předpřipraveny otvory pro uchycení zavážecího zařízení, které nebylo zpracováno v rámci této práce, ale bude součástí realizace pro zákazníka.



*Obr. 43 3D pohled na sestavu dávkovacího zařízení*

## Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh konstrukčního řešení vážené nádoby, která je součástí plně automatizovaného systému plnění formy lisu. V úvodu práce jsem se věnovala řešerši z oblasti dávkování sypkých hmot v průmyslových procesech, s důrazem na vážené zásobníky a jejich konstrukční řešení. Uvedeny jsou také možnosti využití tenzometrů a také vyhodnocovací a řídicí jednotky využívané při vážení.

Následuje popis současného stavu na pracovišti, do kterého je navrhované zařízení určeno. Na základě provedené analýzy stavu jsem navrhla tři varianty možného řešení, z nichž každá má své výhody i nevýhody. Nakonec jsem vybrala variantu dávkování materiálu za pomoci vibrací, která je v diplomové práci dále rozvíjena.

Aby došlo k lepšímu pochopení chování materiálu během celého procesu, provedla jsem měření mechanicko-fyzikálních vlastností materiálu. Naměřené parametry posloužily ke konstrukčnímu návrhu a také k potřebným výpočtům.

Vzhledem k tomu, že se jedná o návrh zařízení do reálného provozu, bylo nutné ověřit předpoklad, že vibrace budou mít pozitivní vliv na vyprázdnění materiálu ze zásobníku. Za tímto účelem byly provedeny zkoušky. Ty ukázaly, že minimální potřebná frekvence, vyvolávána externím zařízením – vibromotorem, je 25 Hz pro 4 kg materiálu. Zkoušky ukázaly, že vibracemi lze dosáhnout plynulého dávkování materiálu do formy lisu.

Proto jsem se v další části práce zaměřila na konstrukční návrh dávkovací nádoby pro konkrétní požadované parametry. Vznikl návrh dávkovacího zařízení, které je tvořeno dvěma nádobami, z nichž každá je osazena vlastním pneumatickým kuličkovým vibromotorem OLI S8. Nádoby rovněž obsahují vlastní uzavírací mechanismus, který je poháněn kompaktním pneuválcem ADN-32-50-I-P-A od výrobce FESTO. Zařízení má být schopno navážet požadovanou dávku materiálu, proto je každá nádoba osazena třemi tenzometry Z6FC3 s kapacitou 20 kg. Objem nádob je dimenzován pro maximální předepsanou dávku materiálu 2 x 9 kg. Správnost zvolených komponentů jsem ověřila výpočty.

Takto navržené dávkovací zařízení bylo opět podrobeno provozním zkouškám, tentokrát přímo s dávkováním do odpovídající formy lisu. Během zkoušek byl mimo jiné měřen čas vyprázdnění, což byl jeden z požadavků zadání. Doba vyprazdňování odpovídala zadání. Zkouškami byly zjištěny drobné nedostatky v konstrukci zařízení.

Proto jsem se v závěru věnovala popisu a způsobům odstranění nedostatků tak, aby bylo zařízení plně funkční. Poslední kapitola obsahuje technický popis navrhovaného zařízení.

Během provozních zkoušek nebyly využívány tenzometrické váhy. Ovšem pro realizaci je nutné do budoucna provést ověření vlivu vibrací na funkci tenzometrických snímačů, aby nedocházelo ke zvyšující se chybě během měření. K tomuto kroku bude nutné zajistit také vyhodnocovací jednotky a vhodné zapojení všech komponentů.

Součástí diplomové práce není konstrukční řešení pojízdného mechanismu, na kterém bude umístěno dávkovací zařízení. V realizaci pro zákazníka bude pojízdný mechanismus přemísťovat dávkovací zařízení z místa plnění nádob materiálem do místa vysypání materiálu do forem.

Příložená výkresová dokumentace obsahuje sestavný výkres dávkovacího zařízení pro plnění formy lisu, sestavu vážící nádoby a sestavu uzavíracího mechanismu. vypracována byla v programu AutoCAD LT 2016 a Solidworks 2015.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] KADLEC, Karel. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření hmotnosti – průmyslové vážení (část 1.). *Cukrovarnické listy* [online]. 1.1.2018 [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: [http://www.cukr-listy.cz/on\\_line/2018/PDF/41-46.pdf](http://www.cukr-listy.cz/on_line/2018/PDF/41-46.pdf)
- [2] *Váhy pro technologické a logistické procesy* [online]. 11.7.2011 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vahy-pro-technologicke-a-logisticke-procesy.html>
- [3] KADLEC, Karel. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření hmotnosti – průmyslové vážení (část 2.). *Cukrovarnické listy* [online]. 1.1.2018 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: [http://www.cukr-listy.cz/on\\_line/2018/PDF/82-86.pdf](http://www.cukr-listy.cz/on_line/2018/PDF/82-86.pdf)
- [4] Zásobníkové váhy: Průmyslové váhy. *TENZONA s.r.o.* [online]. [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.tenzona.cz/zasobnikove-vahy/>
- [5] *DITES: Váhy na sypké materiály* [online]. [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <http://www.dites.cz/Product.aspx?ID=6612&LangID=1&ProdID=1750>
- [6] VOJÁČEK, Antonín. Odporové tenzometry - princip, provedení, použití, historie. *Automatizace.hw.cz* [online]. 19.3.2017 [cit. 2018-01-29]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [7] *Váha pro pásové dopravníky* [online]. [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <https://www.logismarket.cz/tamtron/vaha-pro-pasove-dopravniky/1704996294-1225939581-p.html>
- [8] *Kontinuální průtokový měřicí a dávkovací přístroj: Schenck Process s.r.o.* [online]. [cit. 2018-02-01]. Dostupné z: <http://www.schenckprocess.cz/multistream-g/>
- [9] *Váhy pro silniční vozidla: Schenck Process s.r.o.* [online]. [cit. 2018-02-01]. Dostupné z: <http://www.schenckprocess.cz/vahy-pro-silnicni-vozidla/>
- [10] *Jeřábové váhy* [online]. [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/seznamte-se-s-jeřabovými-vahami-23942.html>
- [11] *Plošinové váhy průmyslové: Wesico servis s.r.o.* [online]. [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: <http://wesico.cz/plosinove-vahy-prumyslove/>
- [12] *Zásobníková váha SOLID* [online]. [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: <https://www.levnevahy.cz/zasobnikove-vahy>
- [13] WASGESTIAN, Petr. *TENZOMETRY HBM* [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10252342-Tenzometry-hbm-petr-wasgestian-petr-wasg-hbm-cz-http-www-hbm-cz.html>



- [14] *Tenzometrické snímače* [online]. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <https://www.tenzometricke-snimace.cz/Tenzometricky-snimac-Tedea-355-200kg-C3-d302.htm>
- [15] *Tenzometrické zásobníkové dávkovací váhy: REGULACE - VÁHY - SYSTÉMY, spol. s r.o. RVS CHODOV* [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.rvs.cz/index.php?page=katalog&vyrobek=tzdv>
- [16] *Slévárenský lící systém: Katalog výrobce* [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: <http://ceramic.cz/wp-content/uploads/2017/09/Gating-System.pdf>
- [17] POLÁK, Jaromír a Aleš SLÍVA. *Dopravní a manipulační zařízení III*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0963-X.
- [18] SCHULZE, Dietmar. *Flow Properties of Powders and Bulk Solids* [online]. , 21 s. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://dietmar-schulze.de/grdle1.pdf>
- [19] *Pneumatický kuličkový vibrátor S8: Průmyslové vibrátory* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.prumyslove-vibratory.cz/prumyslove-vibratory/eshop/1-1-Pneumaticke-vibratory/7-2-Kulickove-vibratory-S/5/12-Pneumaticky-kulickovy-vibrator-S8//description#anch1>
- [20] POLÁK, Jaromír, Karel BAILOTTI, Jiří PAVLIŠKA a Leopold HRABOVSKÝ. *Dopravní a manipulační zařízení II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0493-X.
- [21] *Silentbloky - výrobní program: Rubena* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: [http://www.rubena.cz/underwood/download/files/silentbloky\\_2014.pdf](http://www.rubena.cz/underwood/download/files/silentbloky_2014.pdf)
- [22] *Kompaktní válce dle norem ADN/AEN, ISO 21287: Katalog výrobků. FESTO* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: [https://www.festo.com/cat/en-gb\\_gb/data/doc\\_CS/PDF/CZ/ADN\\_CZ.PDF](https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_CS/PDF/CZ/ADN_CZ.PDF)
- [23] *Vyprazdňování zásobníků a sil. Technologie pro manipulaci se sypkými materiály: Sklenář s.r.o* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.sklenar-technologie.cz/cs/m-57-vyprazdnovani-zasobniku-a-sil/>
- [24] ZEGZULKA, Jiří. *Mechanika sypkých hmot*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2004, 186 s. ISBN 80-248-0699-1.



## Seznam příloh

- Příloha A: Sestavný výkres Plnění formy lisu – KUC0201\_DP\_001
- Příloha B: Sestavný výkres Vážicí nádoba – KUC0201\_DP\_002
- Příloha C: Sestavný výkres Uzavírací mechanismus – KUC0201\_DP\_003
- Příloha D: Výstup měření materiálu rotační smykovou zkouškou

### ***Poděkování***

Děkuji doc. Ing. Janu Nečasovi, Ph.D. za rady a odbornou pomoc při zpracování diplomové práce. Děkuji firmě DSD-Dostál a.s., za umožnění zpracování diplomové práce a jejím zaměstnancům za cenné rady a připomínky. Dále děkuji Centru ENET, VŠB – TU Ostrava za možnost využití jeho výzkumné infrastruktury. Poděkování patří také celé mé rodině za podporu během studia.